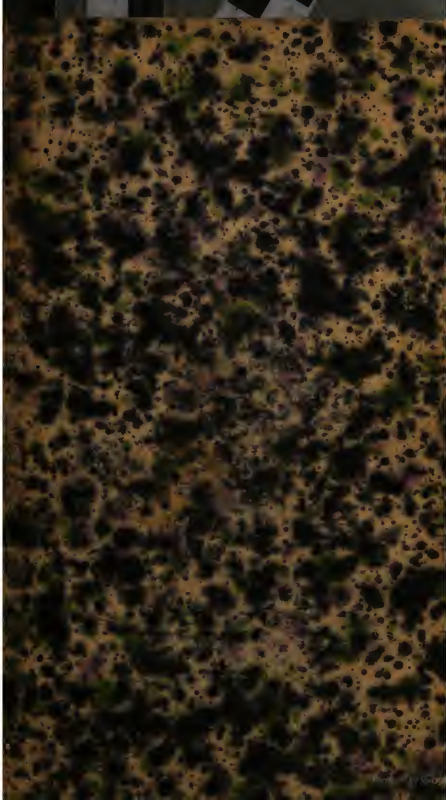
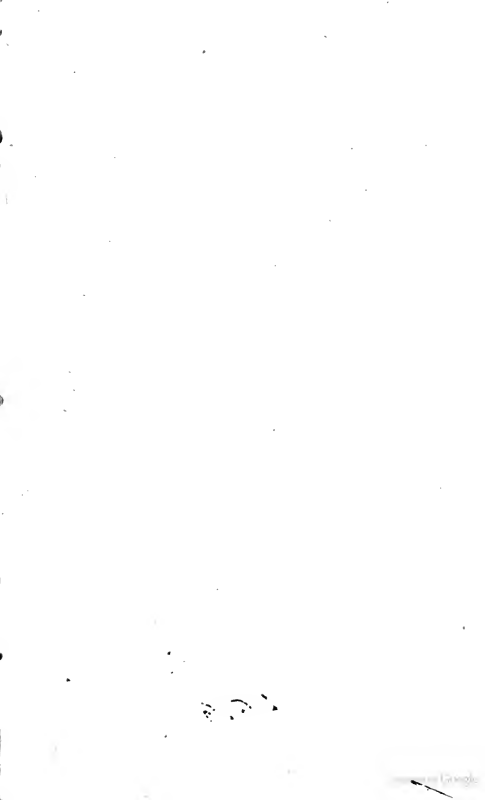




15.7.616

616.



10.

EXPOSÉ
DES
APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ

PARIS. — IMPRIMERIE DE J. CLAYE

RUE SAINT-BENOIT, 7.

EXPOSÉ
DES APPLICATIONS
DE L'ÉLECTRICITÉ

PAR
LE V^{TE} TH. DU MONCEL

TOME PREMIER
NOTIONS TECHNOLOGIQUES

DEUXIÈME ÉDITION



PARIS

LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET C^e

RUE PIERRE-SARRAZIN, 14

1856



PRÉFACE

DE LA DEUXIÈME ÉDITION

Quand je me suis décidé à faire paraître, il y a deux ans, la première édition de cet ouvrage, je n'avais qu'une confiance très-limitée dans le succès qu'il pourrait avoir; car, je ne me dissimulais pas que les ouvrages scientifiques spéciaux, même les meilleurs, et je ne me flattais pas que le mien fût de ce nombre, n'ont qu'un très-petit nombre de lecteurs. Dans cette croyance, et dans le but seulement d'empêcher que les applications qu'on avait faites jusque-

là de l'électricité ne fussent perdues pour l'avenir, j'avais cherché à les résumer toutes le plus brièvement possible, au risque même de ne pas toujours être parfaitement compris; en un mot, je ne voulais faire alors qu'un *Catalogue raisonné* des différentes inventions qui avaient trait à l'électricité. Contrairement à mon attente, mon livre s'est trouvé avoir un certain succès, principalement sans doute à cause du sujet que je traitais. L'édition ayant été épuisée en moins de dix-huit mois, je me suis mis à rechercher à quel public je m'étais adressé, afin de combiner en conséquence ma deuxième édition. Je n'ai pas tardé à reconnaître que c'était aux mécaniciens, aux industriels, et surtout aux inventeurs, que je devais désormais parler. En conséquence, j'ai dû écarter de mon ouvrage toutes les questions théoriques et insister particulièrement sur les détails pratiques et d'exécution. D'ailleurs, deux traités remarquables sur l'électricité, auxquels étaient attachés des noms illustres, venaient de paraître, et je ne pouvais un seul instant avoir la pensée de mettre mes faibles travaux en parallèle avec ceux de nos grands maîtres de la science. Je me suis donc mis résolument à l'œuvre pour re-

fondre mon ouvrage, et en faire cette fois, non plus un exposé des applications de l'électricité, mais bien un traité complet.

Un défaut capital de ma première édition, défaut qui était la conséquence de ma défiance dans son succès, c'était l'absence des plans et des dessins qui auraient pu aider puissamment à la compréhension des inventions que je décrivais. Dans cette nouvelle édition, je n'ai pas épargné les frais sous ce rapport, et un grand nombre de planches, gravées sur acier, permettront, non-seulement de se faire une idée complète des appareils, mais encore de les exécuter facilement. L'omission que j'avais faite également dans ma première édition, des renseignements technologiques se rapportant aux moyens d'exécution et à la réalisation de certains effets particuliers aux applications électriques, était encore une immense lacune dans un ouvrage destiné aux industriels. Cette fois, j'ai consacré près d'un volume à ces renseignements, qui seront pour les constructeurs ce que sont pour les artistes les ficelles de leur art. La plupart de ces renseignements sont encore ignorés, et il m'a fallu pour les réunir, non-seulement les rechercher chez les in-

venteurs et les constructeurs, mais encore les deviner et souvent même les imaginer.

Ma nouvelle édition se compose de trois volumes d'au moins 500 pages chacun. Le premier, comme je le disais, est consacré aux renseignements technologiques; il est divisé en deux livres, et ces livres sont eux-mêmes divisés, le premier, en six chapitres, le second, en huit. Voici quels sont les sujets traités dans ces différents chapitres.

LIVRE I. — EXPOSÉ DES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES.

- | | |
|----------------------------|---|
| I. Électricité statique. | V. Diverses causes productrices de l'électricité. |
| II. Électricité dynamique. | VI. Transmission de l'électricité. |
| III. Magnétisme. | |
| IV. Electro-magnétisme. | |

LIVRE II. — NOTIONS TECHNOLOGIQUES.

- | | |
|---|--|
| I. Des piles. | V. Relais et Rhéotomes. |
| II. Des circuits et des courants. | VI. Intermédiaires électro-mécaniques. |
| III. Des organes électriques, susceptibles d'être employés dans les applications électriques. | VII. Machines d'induction. |
| IV. Interrupteurs et commutateurs. | VIII. Instruments d'expérimentation. |

L'inspection de la table des matières peut montrer d'un seul coup-d'œil avec quels détails ces différentes questions ont été traitées.

Le second volume se rapporte essentiellement aux applications physiques et mécaniques, et se divise comme on le voit ci-après.

LIVRE III. — APPLICATIONS MÉCANIQUES.

- | | |
|---|--|
| I. Télégraphie électrique.
II. Application de l'électricité à la sécurité des chemins de fer.
III. Horlogerie électrique. — Compteurs électro-chronométriques. — Régulateurs, — Horloges électriques. | IV. Application de l'électricité aux observations scientifiques et de précision. — Chronographes. — Enregistreurs météorologiques et astronomiques. — Applications de la télégraphie électrique à la météorologie et à l'astronomie. — Appareils divers. |
|---|--|

Le troisième volume comprend les applications industrielles de l'électricité, les applications physiques et physiologiques; il est divisé de la manière suivante:

LIVRE III (Suite). — APPLICATIONS MÉCANIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ.

- | | |
|---|--|
| V. Applications de l'électricité à l'industrie, aux arts et aux usages domestiques. — Électro-tissage. — Applications diverses des sonneries électriques. — Appareils électromusicaux, etc., etc.
VI. Moteurs électriques. | VII. Accessoires de la télégraphie électrique. — Relais. — Double transmission des dépêches. — Appareils silencieux-parafoudres. — Dispositions des postes télégraphiques. |
|---|--|

LIVRE IV. — APPLICATIONS PHYSIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ.

- | | |
|--|---|
| I. Lumière électrique.
II. Applications des effets calorifiques de l'électricité. | III. Appareils fondés sur les réactions de l'électricité atmosphérique. |
|--|---|

LIVRE V. — APPLICATIONS PHYSIOLOGIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ.

Dans le cours de cet ouvrage, on pourra voir figurer beaucoup de noms d'inventeurs inconnus dans la science, que j'aurais pu passer sous silence, en me

servant, comme certains auteurs, de l'interminable phrase ON a fait telle chose ; ON a imaginé tel moyen. Mais, outre que je trouve cette manière d'agir injuste pour ceux qui ont leur réputation à faire, je ne vois pas pourquoi des noms obscurs ne seraient pas mis en lumière lorsque les personnes auxquelles ils appartiennent ont fait quelque chose de bon. Il m'est impossible de partager cet esprit d'exclusion et de coterie qui s'oppose au développement des talents naissants, et qui, sous prétexte de débarrasser la science de détails inutiles, la laisse incomplète et sans progrès.

Dans mon ouvrage, j'ai cherché autant que possible à réunir toutes les inventions ayant rapport à l'électricité. Sans doute, parmi ces inventions, il en est quelques-unes qui ne sont pas du premier mérite ; mais je n'ai pas voulu les omettre, dans la pensée qu'on peut trouver même dans des inventions de médiocre importance quelques renseignements utiles. Enfin j'ai cherché, autant que possible, à être impartial, et à rendre à *César ce qui appartient à César*.

En raison de la promptitude avec laquelle les découvertes scientifiques se succèdent, et afin de main-

tenir toujours mon ouvrage à la hauteur de la science, je me suis décidé à faire paraître, tous les ans, au mois de janvier, jusqu'à l'épuisement complet de la présente édition, une brochure supplémentaire. Dans cette brochure, comme dans les appendices qui terminent chaque volume, les découvertes dont il sera question seront classées par rapport aux chapitres dans lesquels l'ouvrage a été divisé, et formeront, étant une fois réunies, un quatrième volume qui complétera l'ouvrage.

TH. DU MONCEL.

EXPOSÉ

DES

APPLICATIONS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

DE

L'ÉLECTRICITÉ

Si la littérature et les œuvres de l'imagination charment l'esprit et parlent au cœur, les sciences, par leur initiation aux secrets de la nature et surtout par leurs admirables applications, élèvent l'âme, agrandissent les idées et imposent à l'imagination elle-même en réalisant souvent le merveilleux que celle-ci aurait à peine osé concevoir. Il est vrai que le merveilleux n'est plus de notre siècle, par l'habitude que les sciences nous ont donnée de ne plus nous étonner de rien ; mais si on fait un retour dans le passé, et qu'on se rende compte de l'impression qu'auraient dû produire certaines découvertes, quelle haute idée n'aura-t-on pas de l'intelligence de l'homme appliquée à l'étude des grandes lois qui gouvernent le monde ? Qu'auraient pensé nos pères si on leur avait annoncé, il y a cent ans, que des convois entiers de voyageurs et de marchandises seraient transportés, avec une vitesse de vingt ou trente lieues à l'heure, à travers les entrailles de la terre, au-dessus des vallées, à travers les bras de mer même ; que les navires pourraient lutter victorieusement contre vent et marée sans dévier, au milieu des flots en furie, de leur vraie direction ; que l'on pourrait correspondre d'un bout de la terre à

l'autre aussi vite qu'avec la parole; que la nature se peindrait elle-même sur le papier; que la douleur pourrait être momentanément suspendue; qu'enfin des villes entières pourraient être éclairées par la combustion d'une substance invisible? Certes, ils auraient pu taxer de rêveur celui qui leur aurait annoncé toutes ces merveilles; et, pourtant, c'est ce que nous voyons tous les jours. Que ne verrons-nous pas encore?

Des différentes branches des sciences physiques, l'électricité est certainement celle qui a fait les progrès les plus rapides, et dont les résultats sont les plus merveilleux. Baser tout un système de combinaisons et d'applications sur ce principe reconnu possible : Qu'un mouvement mécanique, une réaction chimique ou calorifique, un effet physiologique ou lumineux, peuvent être transmis, à une distance illimitée, par un élément invisible qui pourrait parcourir quatre fois au moins le tour du globe dans une seconde de temps, et cela, par l'intermédiaire de fils que l'on voit à peine, sans qu'on puisse découvrir en eux le plus léger mouvement, le plus petit changement dans leur aspect, n'est-ce pas, en effet, quelque chose qui, au premier abord, surprend la pensée, et peut paraître surnaturel et irréalisable? Eh bien! c'est là pourtant le secret de ces merveilleuses applications qui vont faire le sujet de cet ouvrage.

Jusqu'à présent, presque tout le monde résume les applications de l'électricité dans la télégraphie électrique. Il ne faudrait pourtant pas croire qu'elle seule ait bénéficié d'un élément aussi extraordinaire dans ses effets; une foule d'autres applications en ont été faites pour nous venir en aide dans nos travaux, nos industries et même nos besoins journaliers. Tous les jours on en imagine de nouvelles, et nul ne peut prévoir toutes les ressources qui pourront encore naître de cet agent mystérieux : c'est, sans contredit, l'élément physique dont les applications ont le plus d'avenir.

LIVRE PREMIER

EXPOSÉ DES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES

Lorsque nous entendons les éclats et les roulements du tonnerre ; quand nous voyons le ciel sillonné par ces traits de feu que nous n'osons fixer qu'avec un certain effroi, nous avons peine à comprendre qu'un élément aussi terrible dans ses effets, et que nous croyons être en quelque sorte le partage exclusif du ciel, puisse se développer à côté de nous, suivant notre désir, dans telle proportion et avec telle intensité qu'il nous convient ; enfin nous nous figurons difficilement que nous puissions disposer de la foudre pour l'asservir à nos besoins et à nos caprices.

Pourtant plusieurs moyens sont en notre pouvoir pour faire naître cet élément extraordinaire auquel on a donné le nom d'électricité ; le frottement exercé sur certains corps, les réactions chimiques, la chaleur, la pression, la combustion, le fluide vital même et l'acte de la végétation développent de l'électricité, et il ne s'agit que d'opérer avec un plus ou moins grand nombre de ces éléments producteurs pour obtenir cet agent physique avec une plus ou moins grande force, en plus ou moins grande quantité.

L'électricité peut se présenter à nous sous deux états complètement différents, du moins quant aux réactions

extérieures qu'elle produit : à l'état d'accumulation ou *statique*, et à l'état de mouvement ou *dynamique*. De là les dénominations d'électricité statique et d'électricité dynamique qui ont été employées pour désigner l'ensemble des phénomènes électriques qui se rapportent à l'un ou à l'autre de ces deux états.

I

ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

Quand l'électricité statique est développée dans de faibles proportions, elle ne manifeste sa présence que par certains phénomènes d'attraction qu'elle exerce sur les corps légers ou très-divisés. Ainsi, quand on frotte avec un morceau de drap certaines substances, telles que l'ambre, le verre, la résine, le soufre, etc., et qu'on les approche de petits morceaux de papier ou de moelle de sureau, on voit ceux-ci se précipiter immédiatement sur le corps frotté, y rester quelques instants adhérents, puis s'en détacher et retomber à terre. Cet effet avait été observé par les Grecs plus de 600 ans avant J.-C., et la cause en fut appelée par eux *électricité*, mot qui, en grec, se rapporte à la substance appelée *ambre*, sur laquelle le phénomène avait été pour la première fois observé.

Jusqu'au xvii^e siècle, ces attractions électriques et les répulsions qui en sont la conséquence, furent la seule manifestation de l'électricité qui eût été observée; mais, à cette époque, Otto de Guéricke, physicien allemand, celui-là même qui découvrit, simultanément avec Galilée, la pesanteur de l'air et la machine pneumatique, ayant obtenu pour la première fois l'étincelle électrique ou plutôt une trainée lumineuses accompagnée d'un grand dégagement d'électri-

cité¹, tous les physiciens de l'époque se mirent à étudier les propriétés de ce nouvel agent physique, avec d'autant plus d'ardeur qu'il semblait, jusqu'à un certain point, expliquer beaucoup de phénomènes extraordinaires consignés dans l'histoire et demeurés jusque-là² dans le domaine du merveilleux.

Ce furent Gilbert, médecin anglais, et Gray, physicien du même pays, qui firent le plus fructifier dans ce temps la découverte d'Otto de Guérické; le premier, en collationnant et en expliquant tous les faits épars qui pouvaient avoir trait à ce genre de phénomènes; l'autre, en découvrant que les corps conducteurs qui ne prennent pas d'électricité quand on les frotte, peuvent cependant en prendre d'une autre manière, et voici comment il s'en aperçut : après avoir électrisé un tube de verre ouvert par les deux bouts, Gray voulut s'assurer s'il obtiendrait les mêmes résultats en fermant le tube avec un bouchon de liège, car, à cette époque, la science était si peu avancée que l'on essayait de tout au hasard, on n'avait rien pour se conduire, pas même un système. Or, en faisant l'expérience, Gray s'aperçut avec un grand étonnement que le bouchon lui-même était devenu électrique, tandis qu'il ne l'est jamais quand on le frotte directement. Une tige de métal, plantée dans le bouchon, devint électrique comme lui, une tige plus

1. L'appareil d'Otto de Guérické consistait en un globe de soufre monté sur un axe horizontal, auquel il imprimait un mouvement de rotation, tandis qu'un frottoir était appliqué sur la surface du globe. Le frottement qui en résultait produisait un dégagement d'électricité assez considérable pour être accompagné d'une traînée lumineuse.

2. On trouve ce passage remarquable dans les Commentaires de César : « Vers ce temps-là parut, dans l'armée de César, un phénomène extraordinaire ; au mois de février, vers la seconde veille de la nuit, il s'éleva subitement un nuage épais suivi d'une pluie de pierres; les pointes des piques de la cinquième légion parurent s'enflammer (*De Bello Africano, caput VI*). » Ce phénomène est connu maintenant sous le nom de feux Saint-Elme.

longue le devint également, et l'habile observateur ne se lassait pas de répéter des expériences aussi curieuses. Voyant qu'il ne pouvait pas, dans son cabinet, ajuster au bouchon des tiges assez longues, il imagine de monter au premier étage et de suspendre à son tube électrisé un fil de métal descendant jusqu'au sol. Il frotte le tube, et un de ses amis présente des corps légers à l'extrémité du fil; chose surprenante! les corps légers y sont vivement attirés; on répète l'expérience au second, au troisième étage, et toujours avec le même succès. Il en conclut naturellement que les métaux avaient la propriété de transmettre l'électricité, et que puisqu'ils la transmettaient instantanément, il fallait que l'électricité fût une espèce de fluide qui passât du verre au métal et se répandît instantanément sur toute la surface de ce dernier.

C'est ainsi qu'en 1727 fut découverte la plus importante des propriétés des corps par rapport à l'électricité, propriété qui les classe en deux catégories : *corps bons conducteurs*, et *corps mauvais conducteurs* de l'électricité.

Cette découverte importante fut bientôt suivie d'une autre plus importante encore, sous le rapport de l'action physique en elle-même : celle de la bouteille de Leyde, par Musschenbroek, en 1746. Elle démontra non-seulement que l'électricité développée sur un corps mauvais conducteur, pouvait agir à distance et à travers les substances les plus dures, mais encore que deux corps pouvaient avoir leur électricité maintenue l'une par l'autre, quand l'un d'eux avait été électrisé primitivement et qu'un corps mauvais conducteur ou *isolant* était interposé entre eux. Dès lors on put former des *condensateurs* de toutes espèces et de toutes grandeurs, et accumuler ainsi de grandes charges électriques au moyen desquelles il fut facile de constater, d'une manière sensible, les propriétés de l'électricité. En un mot,

l'électricité *par influence* venait d'être révélée dans cette découverte, et l'on commença à se rendre compte des phénomènes de la foudre.

Bien que la différence des effets électriques des substances résineuses ou vitrées ait été constatée dès les premiers moments de la découverte du fluide électrique, par suite des réactions réciproques des corps qui les avaient subis, ce ne fut qu'assez tard, vers 1733, que Dufay, physicien français, admit que tous les corps de la nature possèdent deux électricités différentes, dont les effets extérieurs sont diamétralement opposés, mais dont les rapports réciproques sont tels, que l'une attire l'autre et se repousse elle-même. La conclusion de cette hypothèse fut que quand les corps sont à l'état naturel, leurs électricités se trouvent neutralisées l'une par l'autre, et que, par conséquent, leur présence ne peut être accusée que quand une cause étrangère vient à en opérer la séparation. Or, à cette époque, le frottement était regardé comme la seule et unique cause étrangère qui pût avoir action sur les électricités des corps, et l'on disait, ce qui, du reste, est encore vrai maintenant, que parmi les corps de la nature il en est, et ce sont les corps *non conducteurs*, qui peuvent retenir quelque temps à leur surface l'une des deux électricités après que l'autre a été enlevée par le corps frottant, tandis que, chez les autres, leur recombinaison suit de tellement près leur séparation, qu'on ne peut trouver aucun indice de leur présence. De là, le nom de *corps isolants* donné aux premiers, et de *corps conducteurs* donné aux autres.

Franklin, qui commençait alors ses beaux travaux sur l'électricité, voulant simplifier cette théorie, prétendit qu'il n'y avait qu'une seule électricité, et que ses effets n'étaient diamétralement opposés, quand on la faisait naître sur le verre ou sur la résine, que parce qu'elle se trouvait en plus ou en moins dans les corps. De là, le nom d'électricité

positive donné à l'électricité vitrée, et celui d'électricité *negative* donné à l'électricité résineuse.

Ce fut peu de temps après l'invention de la bouteille de Leyde, que Franklin fit sa magnifique découverte du *pouvoir électrique des pointes* qui créa une nouvelle voie à la science électrique, et fut le prélude d'une des plus utiles inventions des temps modernes, le *paratonnerre*.

Mais une chose assez curieuse, c'est qu'en ce moment où la science était encore si peu avancée, Franklin se méprit lui-même sur sa découverte, et attribua à une *affinité d'entrée pour l'électricité*, ce qui n'était qu'une *facilité de sortie*. Ainsi, il croyait que l'électricité, développée sur un corps placé dans le voisinage d'une pointe métallique, était attirée par cette pointe, tandis, qu'au contraire, cette électricité n'agit que par influence sur le métal de la pointe en attirant à elle l'électricité du nom contraire qui, par ce moyen, s'écoule librement et en repoussant dans le conducteur l'électricité de même nom. Toutefois, comme le résultat est le même dans une hypothèse comme dans l'autre, le pouvoir des pointes fut immédiatement appliqué aux machines électriques, qui furent dès lors garnies de conducteurs métalliques isolés, espèces de réservoirs où vient s'emmagasiner l'électricité, et qui peuvent la fournir directement, sans condensateurs, en assez grande quantité.

Dire ce que cette découverte rapporta à la science, ce serait énumérer toutes les découvertes qui se sont faites depuis ce moment dans l'électricité statique ; car ce fut seulement alors que les instruments furent construits de manière à ne pas présenter de surfaces anguleuses, et à être véritablement en rapport avec le but qu'on se proposait dans les expériences.

Ainsi, grâce à la découverte d'Otto de Guéricke, qui démontra que l'électricité était un fluide particulier comme la lumière et la chaleur, et qui attira l'attention des savants

sur un phénomène observé sans fruit depuis plus de deux mille ans; grâce à la découverte de Gray, qui trouva que l'électricité pouvait se transmettre instantanément d'une extrémité à l'autre d'un corps conducteur par le simple contact; grâce à l'invention de Musschenbroek, qui constata un nouveau mode d'action de l'électricité, le mode d'action par influence; grâce, enfin, à Franklin, qui démontra que les corps électrisés laissaient écouler leur électricité par les pointes, la science électrique fit de tels progrès qu'en moins d'un siècle elle constitua une des branches les plus curieuses de la physique, et comprit à peu près tous les phénomènes qui avaient rapport à ce genre de manifestation de l'électricité que l'on a désignée sous le nom d'*électricité statique* ou de *tension*, parce qu'effectivement, après s'être déplacées, les électricités des corps se trouvent accumulées à l'état de repos sous l'action de la cause qui leur a donné naissance. Il était réservé à notre siècle d'entrer dans une nouvelle voie bien plus fertile encore en merveilles, et cette voie a été ouverte par *Volta!*...

II.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

A quoi tiennent pourtant les choses de ce bas monde!.... C'est en suspendant par hasard au balcon de sa fenêtre des grenouilles qu'il venait de disséquer, que Galvani, médecin à Bologne, découvrit, en 1789, l'existence de l'électricité dynamique, et préluda ainsi à l'une des plus belles découvertes des temps modernes, la *pile électrique*. Pour un homme ordinaire, les phénomènes de contraction qu'il observa dans les muscles de ces grenouilles ainsi suspendues n'auraient que faiblement attiré l'attention, et on se serait

contenté de quelque raison spécieuse, quasi-philosophique, qui n'aurait conduit à aucun examen sérieux de la question; mais, pour un observateur aussi habile que Galvani, la perception du phénomène fut un trait de lumière qui lui fit entrevoir, dès le premier moment, un avenir de découvertes. Il examina alors avec une scrupuleuse attention les conditions dans lesquelles s'était manifesté le phénomène, et s'assura d'abord qu'il n'avait lieu que quand les muscles étaient en contact avec le fer du balcon; en second lieu, il reconnut que le crochet de cuivre qui les suspendait était attaché entre les nerfs lombaires et la colonne dorsale de chaque grenouille. Sa première pensée fut d'admettre dans les corps vivants la préexistence d'un fluide particulier auquel il donna le nom de fluide *galvanique*; mais comme il avait, par des expériences antérieures, observé l'effet de l'électricité sur des grenouilles mortes ou mutilées, l'idée lui vint bientôt que ces phénomènes de contraction étaient dus au fluide électrique. Pour en expliquer l'action, qui ne se manifestait qu'au double contact métallique, il admit que certains organes des corps vivants possédaient une électricité, que d'autres organes possédaient l'électricité contraire, et que ces électricités se trouvaient maintenues en présence de la même manière qu'elles le sont dans les deux armures d'une bouteille de Leyde. Dès lors, la communication métallique entre ces deux sortes d'organes donnait lieu à une recomposition des deux électricités, c'est-à-dire à une décharge électrique qui agissait en contractant ces organes.

Cette découverte agita en ce moment à tel point le monde savant que les expériences de Galvani furent répétées dans toute l'Europe. La plupart admettaient l'hypothèse de Galvani, d'autres croyaient découvrir dans ce fait l'explication de la *vie* et voyaient déjà le couronnement des doctrines matérialistes si ardemment prêchées à cette époque. Parmi

ces savants, Volta, professeur à Pavie, sans partager l'opinion de Galvani, admirait beaucoup sa découverte; mais en l'étudiant sous toutes ses faces, il s'aperçut qu'un détail d'expérimentation avait été omis dans les déductions théoriques de ce savant, et il prétendit que ce détail à lui seul pouvait expliquer la création de l'électricité produite. Ce détail était l'intervention de deux métaux différents unis par le contact. En vain lui représenta-t-on qu'un arc composé d'un seul métal donnait lieu au même phénomène. Volta opposa à cette objection que l'effet était beaucoup plus marqué quand l'arc était composé de deux métaux différents, et que si le phénomène avait lieu avec un seul métal, cela tenait à ce qu'il n'y avait pas de métaux parfaitement purs : la preuve, disait-il, c'est qu'il suffisait de frotter les extrémités de l'arc composé d'un seul métal sur un autre métal, pour rendre le phénomène plus sensible. En définitive, sa théorie prévalut, surtout quand, pour prouver la vérité de son hypothèse, il imagina sa *pile*.

Dans ce temps où la connaissance de l'influence des réactions chimiques sur la production de l'électricité était encore à naître, on cherchait toujours à expliquer les phénomènes nouveaux avec les éléments déjà connus, et Volta, par son hypothèse, faisait une révolution dans la science. Cependant, l'étude plus approfondie qu'on fit plus tard des phénomènes de l'électricité dynamique, prouva que de même que Franklin, Volta s'était mépris en quelques points sur sa découverte, et que Galvani, quoi qu'on en ait dit, était plus rapproché de la vérité, du moins en ce qui concerne l'existence de fluides électriques développés chez les animaux. En effet, M. Matteucci est parvenu à faire une pile voltaïque, en superposant les uns sur les autres des muscles d'animaux en nombre suffisamment grand.

Pour expliquer la production de l'électricité par le contact de métaux différents, Volta admettait l'existence d'une cer-

taine *force électro-motrice* qui devait se développer au moment de ce contact et qui agissait comme le frottement, en décomposant les fluides électriques des métaux, de telle manière que l'un se chargeât d'électricité positive et l'autre d'électricité négative. Il observa de plus, et c'est là véritablement la partie essentielle de sa découverte, qu'en empiquant, couple par couple, dans le même ordre, un certain nombre de disques métalliques de différente nature, par exemple, cinquante disques de cuivre et cinquante disques de zinc, et en séparant chaque couple par une rondelle de drap humide, on accumulait sur les deux disques extrêmes tous les effets électriques de chaque couple en particulier. Il en conclut naturellement que plus cette pile ainsi formée aurait d'*éléments* ou de couples, plus il obtiendrait de charge électrique; et qu'en réunissant ces deux éléments extrêmes, auxquels il donna le nom de *pôles*, par un conducteur métallique, on devait obtenir une décharge électrique incessante, puisque la cause qui développait la force électro-motrice était permanente. Ce fut ainsi que, sans s'en douter, dans l'origine et dans le but de soutenir son hypothèse contre la théorie de Galvani, Volta dota le monde d'une des plus belles découvertes de la science moderne.

Depuis la pile à colonnes de Volta, qui fut le point de départ de toutes les découvertes faites dans l'électricité dynamique, on a fait bien des espèces de piles. La pile à auges, la pile de Wollaston, la pile à hélices et la pile sèche de Zamboni en furent les premières modifications. Mais les perfectionnements les plus importants ne lui ont été apportés que quand on a pu constater l'influence des réactions chimiques dans la production de l'électricité. Dès lors, abandonnant la théorie de Volta, on fit des piles à deux liquides, et ces piles si énergiques, si constantes dans leur action, furent substituées avec infiniment d'avantages à leurs aînées dans toutes les expériences et les applications

qu'on pouvait en faire. Ces sortes de piles sont assez nombreuses et ont des propriétés différentes. Ainsi, celles de Grove produisent beaucoup d'électricité, mais elles sont très-dispendieuses, tandis que celles de Daniell, qui sont très-économiques, ont le grand mérite, quand il ne s'agit que de très-petits effets à produire, d'être d'une régularité parfaite, et d'agir quelquefois des semaines entières sans qu'on s'en occupe. Toutes ces piles, d'ailleurs, reposent sur ce principe, découvert il y a seulement quelques années, que, dès-lors qu'une réaction chimique s'effectue, il y a dégagement d'électricité : dégagement d'électricité positive par certains corps appelés *electro-négatifs*, comme l'oxygène, lorsqu'il y a combinaison : alors le corps avec lequel ils se combinent se trouve chargé d'électricité négative ; puis dégagement d'électricité négative par certains autres corps appelés *electro-positifs*, comme l'hydrogène, au moment de leur combinaison avec d'autres corps qui se trouvent alors chargés d'électricité positive. Inutile de dire que pour une décomposition chimique, le dégagement électrique s'opère d'une manière complètement inverse.

Jusqu'ici nous avons parlé de l'électricité de la pile ou de l'électricité dynamique, sans nous rendre bien compte de sa nature. Il y a pourtant une bien grande différence entre la manifestation extérieure de ce genre d'électricité et celle de l'électricité statique que nous avons étudiée dans le précédent chapitre. Quand ce fluide est à l'état statique, il se développe à la surface des corps conducteurs suffisamment isolés, et en raison de son état de tension, il cherche toujours à les abandonner pour se porter à droite et à gauche sur les corps les plus voisins. Mais quand il se manifeste à la suite d'une action chimique comme celle accomplie par la pile, cette mobilité, cette tension n'existent plus, et il faut, pour constater la présence du fluide, qu'on unisse les deux pôles qui la font naître à l'état positif

et à l'état négatif par un conducteur métallique. Alors, les recombinaisons incessantes qui se manifestent donnent lieu à un courant qui marche toujours du pôle positif au pôle négatif de la pile. De là le nom d'électricité *dynamique* ou d'électricité en *mouvement* donné à l'électricité développée dans la pile.

A l'époque de la découverte de la pile de Volta, la chimie venait de sortir du domaine des alchimistes, et commençait à former une science importante, par suite des magnifiques travaux des Lavoisier, des Fourcroy et des Davy. Tous les savants du temps en étaient plus ou moins préoccupés, et, en conséquence, ce fut elle qui reçut les premières applications des effets de la pile. Bientôt (en 1800) l'eau fut décomposée sous l'action du courant voltaïque, par MM. Carlisle et Nicholson. On reconnut ensuite l'influence différente exercée par les deux pôles de la pile par rapport aux acides et aux alcalis; mais ce ne fut que quand Davy décomposa la potasse, qu'on jugea de toute la puissance de cet élément extraordinaire.

Dès lors on ne douta plus d'aucune décomposition chimique, et les découvertes successives du principe métallique des bases salifiables, regardées jusque-là comme corps simples, justifièrent pleinement cette prévision. Une seule de ces bases avait échappé à Davy, c'était l'ammoniaque. Mais, en 1808, Seebeck, de Berlin, trouva également son principe simple, auquel il donna le nom d'*ammonium*, quoique ce principe simple fût, comme le *cyanogène*, un principe lui-même composé.

Plus tard, les différentes et nombreuses découvertes faites par MM. Faraday, Becquerel, de La Rive, Schombéin, etc., firent des réactions électro-chimiques une science des plus fertiles en applications utiles.

Jusqu'en 1820, époque à laquelle OErsted fit sa magnifique découverte des réactions magnétiques des courants, les

effets physiques de la pile furent peu étudiés, et consistaient simplement dans les phénomènes de lumière et de chaleur qui se produisent quand on fait passer le courant d'une pile extrêmement forte entre deux pointes de charbon très-serré, encore ne s'en était-on rendu que médiocrement compte, puisqu'on attribuait à la combustion ce qui n'était dû en grande partie qu'au transport des molécules charbonnées par le courant : la preuve, c'est qu'en plaçant ces charbons dans le *vide* ou dans l'*eau*, l'usure ne s'en fait pas moins avec dégagement de lumière, bien que la combustion ne puisse alors avoir lieu.

Du reste, c'est même à ce transport des particules charbonnées par le courant que la lumière électrique doit tout son éclat, et cela parce que la flamme, quelle qu'elle soit, n'est pas lumineuse par elle-même, et serait invisible sans la présence de particules matérielles qu'elle chauffe au rouge blanc et qu'elle entraîne toujours plus ou moins avec elle. En effet, l'hydrogène et l'alcool ont une flamme à peine visible; mettez, au milieu de cette flamme une éponge de platine et vous aurez de la lumière.

Les perfectionnements apportés dans ces derniers temps à la lumière électrique ont été très-nombreux, et l'on peut maintenant, au moyen de régulateurs convenablement disposés, obtenir une lumière continue d'une intensité égale à plusieurs centaines de becs de gaz.

Puisque c'est à l'excessive chaleur développée par le courant voltaïque, quand il passe à travers le charbon, que la lumière électrique doit tout son éclat, on peut juger par elle des effets calorifiques que l'on peut obtenir. Aucuns métaux ne peuvent y résister, et le platine lui-même est volatilisé.

III.

MAGNÉTISME.

La connaissance des phénomènes de l'attraction du fer par les aimants est d'une date au moins aussi ancienne que celle des phénomènes électriques, mais comme ces effets ne se manifestaient alors que sous l'influence d'un certain minéral de fer que l'on trouvait particulièrement à Magnésia, ville de Lydie, on leur donna le nom de phénomènes *magnétiques*. Platon parle de la pierre d'aimant dans plusieurs de ses dialogues, et Pline rapporte qu'un certain Dinacorès proposa à Ptolémée Phyladelphe de bâtir à Alexandrie un temple dont la voûte garnie de pierres d'aimant soutiendrait en l'air une statue d'Arsinoé.

Sans nous arrêter aux hypothèses absurdes qui ont été émises dans l'antiquité pour expliquer les effets magnétiques, nous nous bornerons, pour le moment, à dire que tout aimant, par cela même qu'il est aimant, possède aux deux extrémités de son plus grand diamètre, deux pôles ou centres d'action magnétique dont l'effet sur le fer peut être identique, mais dont les réactions sur le même pôle d'un autre aimant sont diamétralement opposées. Dans un cas, en effet, il y a une attraction très-marquée, tandis qu'il y a répulsion dans l'autre.

Longtemps ces attractions et ces répulsions furent regardées comme la seule manifestation du magnétisme, mais la découverte, dans le *xvi^e* siècle, des propriétés de l'aiguille aimantée, par rapport au globe terrestre, attira l'attention des savants sur cet agent physique, et bientôt on reconnut que les pôles des aimants qui étaient de même nature, par

exemple, ceux qui se dirigeaient vers le Nord quand les aimants étaient librement suspendus, se repoussaient quand ils étaient exposés à leur action réciproque. Au contraire, il y avait attraction quand cette action réciproque s'exerçait entre des pôles de nom contraire. Dès lors, on assimila le globe terrestre à un vaste aimant, et l'on en conclut que la direction vers le Nord de l'aiguille aimantée venait tout naturellement de ce que le fluide magnétique du pôle boréal de la terre était de nom contraire à celui de l'aiguille qui se trouvait dirigé vers lui. Par assimilation, on donna aux pôles des aimants, pour les distinguer, le nom de pôle austral ou de pôle boréal, suivant leur direction vers le Nord ou vers le Sud.

Une étude plus approfondie des phénomènes magnétiques démontra, entre eux et les phénomènes électriques, une analogie frappante qui fit admettre, comme l'avait supposé Dufay, pour l'électricité, la coexistence de deux fluides magnétiques de nom contraire, dans les corps susceptibles d'aimantation ; mais la répartition *non absolue* de ces fluides aux deux pôles des aimants embarrassa beaucoup les savants, et il fallut compliquer l'hypothèse de Dufay de cette autre hypothèse, que les fluides magnétiques ne peuvent, comme les fluides électriques, se déplacer en totalité, mais seulement de proche en proche par voie de décompositions successives, de molécule à molécule.

Il résulte de cette hypothèse que toutes les molécules qui composent un aimant sont autant d'aimants individuels, dont les effets extérieurs se trouvent neutralisés les uns par les autres, mais qui réagissent à travers leur propre substance, de manière à renforcer, dans les deux sens opposés, leur vertu magnétique, et à accumuler vers les extrémités du barreau (du moins jusqu'à une certaine limite qui dépend de la résistance apportée par la matière à cette action) toute l'énergie dont ils sont susceptibles.

Les réactions réciproques des aimants ayant été ainsi constatées et le magnétisme terrestre reconnu, il devint facile de se rendre compte de l'attraction exercée par les aimants sur le fer doux et même de la formation des aimants au sein de la terre. On trouva en effet que le magnétisme, comme l'électricité, se transmettait par influence, et que le fer, sous l'influence d'un aimant, devenait lui-même un aimant. Dès lors, le phénomène de l'attraction du fer se réduisait à un simple phénomène de réactions magnétiques échangées entre deux aimants. Toutefois, ce phénomène est plus compliqué, et par les considérations qu'on trouvera développées dans le livre suivant, on verra que dans le magnétisme, comme dans l'électricité, il y a des effets statiques et des effets dynamiques qui sont très-différents et qui se manifestent presque toujours simultanément. Cette théorie nouvelle, que j'ai en quelque sorte créée, explique tous ceux des phénomènes magnétiques regardés bien à tort comme des anomalies; car toute action physique doit subir les réactions des effets qu'elle produit ¹.

Pour expliquer la permanence du magnétisme dans certains corps et sa présence momentanée dans d'autres, on a dû admettre l'intervention d'une certaine force coercitive dont les corps seraient tous doués à un degré plus ou moins grand, suivant leur nature et surtout suivant leur disposition moléculaire. Or, cette force coercitive aurait pour propriété de s'opposer à la recombinaison des fluides magnétiques et de maintenir l'effet produit, quand la cause aimantante n'existe plus.

Bien qu'on n'ait pu définir très-nettement cette force, et que nous ignorions encore totalement quelle elle peut être, on a pu cependant apprécier les différents cas dans lesquels

1. Voir mon Mémoire sur le magnétisme statique et dynamique dans les *Comptes rendus* de l'Académie des Sciences, année 1832.

on peut la faire naître. Ainsi, on sait que la trempe de l'acier le rend susceptible de conserver son aimantation; que des actions mécaniques ou des actions chimiques, telles que la torsion, le limage, la percussion, l'oxydation, donnent au fer la même propriété, puisque ce métal peut de cette manière s'aimanter sous l'influence du magnétisme terrestre. On connaît encore le moyen de détruire cette force dans ceux des corps qui la possèdent. Ce moyen, c'est la chaleur. Mais une série de faits nouveaux sont venus, dans ces derniers temps, tellement compliquer la question, que non-seulement il est devenu difficile de préciser la nature de cette force, mais encore d'en expliquer les effets. Quoi qu'il en soit, il paraît certain que c'est à l'oxydation du fer au sein de la terre, oxydation qui a pu fixer le magnétisme développé dans le fer, sous l'influence du magnétisme terrestre, que les aimants naturels, qui ne sont autre chose qu'un minéral de fer, doivent leur formation.

Il n'y a pas longtemps encore que tous les phénomènes magnétiques connus se bornaient aux effets échangés entre les aimants et certains corps, tels que le fer, l'acier, le nickel, le cobalt, le chrome, le manganèse, regardés alors comme les seuls et uniques corps véritablement magnétiques. Aujourd'hui l'on est entré dans une nouvelle voie, et l'on a reconnu que, de même que certains corps étaient attirés par les aimants, de même certains autres étaient repoussés. Bien plus même, on a pu constater que l'état métallique n'était pas une condition indispensable pour que ces phénomènes d'attraction et de répulsion pussent se manifester, et que tous les corps, soit solides, soit liquides, soit gazeux, devaient être plus ou moins impressionnables (d'une manière ou de l'autre) aux aimants. On a donc dû classer les corps, par rapport au magnétisme, en les disant *paramagnétiques*, lorsqu'ils sont attirés, et *diamagnétiques*, lorsqu'ils sont repoussés.

Cette nouvelle mine ouverte à la science en 1848, par M. Faraday, a été exploitée avec beaucoup de succès par MM. Fd. Becquerel, Thyndall et Plucker, et il est résulté de leurs savantes recherches, que la plupart des corps de la nature ne peuvent être paramagnétiques ou diamagnétiques d'une manière absolue, mais seulement d'une manière relative dépendant du milieu dans lequel ils se trouvent. Certains corps peuvent être même à la fois paramagnétiques et diamagnétiques sous certaines conditions dépendant d'un agent physique en apparence complètement étranger au magnétisme; ainsi plusieurs cristaux peuvent être paramagnétiques ou diamagnétiques suivant qu'ils sont positifs ou négatifs, ce qui peut faire supposer dans ce cas que la manière dont s'exerce l'induction magnétique est soumise à des lois de polarisation analogues à celles de la lumière ¹.

IV.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

S'il est une découverte qui, par son importance, puisse être comparée à celle de la pile, c'est bien certainement celle que fit, en 1820, OErsted, physicien danois, des réactions magnétiques des courants électriques. Toutes les applications mécaniques de l'électricité en sont la conséquence.

OErsted était plutôt philosophe que physicien, et, en cette qualité, il s'était créé une théorie à laquelle il tâchait de rapporter tous les phénomènes qu'il observait. L'action électrique des courants sur les aiguilles aimantées avait

1. Voir les lois du magnétisme dans les résumés de mon *Cours d'électricité* et mon *Mémoire sur le magnétisme statique et dynamique*.

bien été observée avant lui, mais aucun physicien ne s'en était préoccupé; plusieurs même l'attribuaient à un effet d'attraction analogue à celui par lequel les corps légers sont attirés vers un corps électrisé. OErsted, croyant que le magnétisme et l'électricité dérivait d'une même cause et devaient avoir des rapports communs, voulut s'assurer des circonstances dans lesquelles se manifestaient ces réactions. Pour s'en assurer d'une manière plus complète, il plaça une de ces aiguilles en équilibre sur un pivot et en approcha le conducteur d'un circuit voltaïque parallèlement à sa direction ordinaire, c'est-à-dire suivant la ligne nord-sud. Quelle fut sa satisfaction, quand il vit cette aiguille abandonner immédiatement sa direction et venir se placer en croix sur le courant! Il n'y avait donc plus à s'y méprendre; une action mécanique pouvait être obtenue par le passage du courant dans un conducteur métallique, et cette action, quelque faible qu'elle fût, pouvait être la source d'une foule d'applications de la plus haute importance. C'est ce qu'entrevit aussitôt OErsted; aussi s'empressa-t-il d'en donner immédiatement connaissance au monde savant.

Deux expériences qui furent la suite de cette découverte fournirent d'abord une application immédiate des réactions magnétiques des courants pour la mesure de leur intensité. On constata, en effet, que cette tendance de l'aiguille aimantée à se mettre en croix sur le courant était d'autant plus grande que celui-ci était plus intense, et que le circuit eu se repliant sur lui-même, passait un plus grand nombre de fois dans le même sens à portée de l'aiguille. On en conclut naturellement qu'en enroulant sur un cadre de bois un fil d'une très-grande longueur, recouvert de soie, et en plaçant au-dessus de l'un des côtés du cadre une aiguille librement suspendue, on devait obtenir un instrument, non-seulement susceptible de mesurer l'intensité des courants,

mais encore d'accuser leur existence quand ils sont très-faibles. C'est, en effet, ce que l'expérience démontra, et c'est ainsi que furent inventés, par M. Schweiger, les galvanomètres. Toutefois, à cause de leur sensibilité, ces appareils ne pouvaient convenir qu'à des courants de très-faible intensité; et comme il était important d'avoir des instruments susceptibles de mesurer des courants assez forts, il vint à l'idée de M. Pouillet de faire construire des *rhéomètres*, auxquels il donna le nom de *boussole des sinus* et de *boussole de tangentes*. C'est à l'aide de ces instruments que cet habile physicien vérifia les lois des courants électriques par rapport à leur intensité, que Ohm, physicien allemand, avait découvertes dès l'année 1827, qu'il put calculer le degré de conductibilité des différents métaux, fixer les lois des courants dérivés, et, enfin, que j'ai pu moi-même déterminer les lois de transmission des courants greffés¹.

La découverte d'OErsted démontrait l'action exercée par des courants voltaïques sur les corps dont la vertu magnétique était développée. M. Arago, par une expérience dont les résultats furent de la plus haute importance, prouva bientôt après que cette action se manifestait également sur les corps magnétiques non aimantés. Il s'assura, en effet, que quand on plonge dans de la limaille de fer le conducteur d'un courant voltaïque un peu intense, cette limaille s'attache à ce conducteur comme à un aimant; il en conclut qu'en multipliant cette action sur un cylindre de fer, on devait obtenir un aimant assez puissant. Effectivement, en enroulant en spirale un fil métallique recouvert de

1. J'ai trouvé, en effet, qu'un circuit électrique sur lequel on greffe un autre circuit de source différente, peut servir de conducteur à ce dernier; mais qu'il s'établit alors une double dérivation qui réagit en affaiblissant ou en renforçant le courant primitif, suivant que l'on considère le circuit qu'il parcourt à droite ou à gauche des points où se trouve greffé le deuxième circuit.

sole et en plaçant dans l'intérieur de la spirale un morceau de fer doux, il trouva que quand le courant circulait dans la spirale métallique, le fer devenait un aimant très-énergique, mais qu'aussitôt que le courant était rompu, l'aimantation disparaissait. Il répéta la même expérience avec des cylindres d'acier; mais cette fois, l'aimantation subsista, et il put s'assurer que la nature des pôles de l'aimant ainsi formé dépendait du sens du courant. Cette double propriété des courants électriques prouva, d'un côté l'analogie du fluide électrique avec le fluide magnétique, et donna l'idée des *électro-aimants* qui résolurent, comme nous le verrons bientôt, le problème de la télégraphie électrique et de toutes les applications mécaniques de l'électricité.

Tel était le point où en était arrivé l'électro-magnétisme, quand Ampère commença ses magnifiques travaux qui eurent pour résultat une théorie complète, que les découvertes subséquentes ne firent que justifier de plus en plus.

Il commença, au moyen d'un appareil très-ingénieux qu'il inventa, par constater les réactions réciproques des courants les uns par rapport aux autres; les réactions des courants à l'égard des aimants et les réactions des courants par rapport aux influences du globe terrestre. Il en conclut que les aimants étaient constitués par un courant électrique qui circulait en spirale autour des substances magnétiques quand elles avaient subi l'aimantation. Au moyen de cette hypothèse et des effets d'attraction et de répulsion des courants, suivant qu'ils marchent dans le même sens ou dans un sens différent, qu'il démontra directement par l'expérience, la découverte d'Oersted et toutes les autres réactions magnétiques des courants se trouvèrent expliquées; et quand MM. Faraday, Pouillet, Savary et de La Rive ajoutèrent à cet ensemble de lois quelques autres propriétés des réactions magnétiques des courants, comme la rotation des aimants sous l'influence des courants, la rotation des

courants sous l'influence de la terre ou des aimants, enfin, la rotation des courants sous l'influence de courants convenablement disposés, ils n'eurent qu'à se reporter à la théorie d'Ampère pour avoir l'explication de leurs expériences.

Je dois pourtant dire, que plusieurs propriétés et plusieurs effets de ces réactions des courants avaient échappé aux illustres savants dont je viens de parler; car quelque habile que l'on puisse être, on ne peut pas tout embrasser. En reprenant en effet toutes les expériences d'OErsted, d'Ampère, etc., j'ai reconnu plusieurs effets importants qui n'avaient pas été signalés et qui ont fait l'objet de quatre Mémoires que j'ai présentés successivement à l'Institut. Ils ont été en partie imprimés dans les Comptes rendus de l'Académie des Sciences ¹.

En 1844, M. Guillemin constata pour la première fois que la propriété d'aimantation qu'acquerrait le fer sous l'influence du courant voltaïque, n'était pas la seule qui pût être utilisée dans les applications mécaniques de l'électricité voltaïque, et qu'un morceau de fer qu'on fait entrer à l'intérieur d'une hélice métallique environ au tiers de sa longueur, se trouve entraîné vigoureusement aussitôt que le courant passe dans l'hélice. Sans se rendre compte du phénomène, M. Guillemin le considérait comme le résultat d'une simple attraction de pôles. Mais comme je l'ai démontré dans un Mémoire présenté à l'Institut le 15 avril 1852, cet effet résulte de la simple attraction de courants parallèles marchant dans le même sens; c'est donc un effet dynamique et non un effet statique. Tel est le raisonnement qui m'a fait entreprendre à ce sujet une série d'expériences par lesquelles j'ai prouvé que le magnétisme existant à l'état statique ou à l'état dynamique, produit dans les deux

1. Voir ma théorie du magnétisme statique et du magnétisme dynamique, dans les Mémoires de la Société des Sciences naturelles de Cherbourg.

cas des effets complètement différents et analogues à ceux de l'électricité statique et de l'électricité dynamique; que dans un cas il y a création d'un courant magnétique, tandis que la condensation des fluides magnétiques a lieu dans l'autre.

Electricité magnétique ou d'induction.

Puisqu'un courant électrique donne naissance à des aimants, on peut supposer que par réciproque un aimant doit engendrer un courant. C'est en effet ce qui a lieu. Mais le fait n'a été démontré par l'expérience qu'en 1830, c'est-à-dire près de dix ans après la découverte de l'électromagnétisme, et c'est à M. Faraday, physicien anglais, que revient toute la gloire de cette découverte si importante pour ses applications.

Ainsi, un aimant permanent entouré d'une hélice métallique dont les spires sont suffisamment isolées peut donner naissance à un courant électrique; mais, par une bizarrerie particulière et qui s'explique pourtant, la production de ce courant n'est qu'instantanée et ne se manifeste qu'au moment où l'on approche l'aimant de l'intérieur de l'hélice et au moment où on l'en retire; encore ces courants éphémères sont-ils en sens inverse l'un de l'autre et distribués d'une manière différente dans chaque moitié du circuit fermé, comme je l'ai démontré dernièrement par la théorie et par l'expérience.

Le même effet se reproduit, et c'est aussi M. Faraday qui le premier a constaté ce fait; quand on remplace l'aimant par une hélice métallique dans laquelle circule un courant électrique, ce qui, d'après la théorie d'Ampère, constitue un aimant dynamique; seulement il est à remarquer que dans les deux cas, ces courants auxquels on a donné le nom de *courants d'induction* sont des courants

d'électricité statique ou de tension, comme le démontre de la manière la plus évidente l'appareil inducteur de M. Ruhmkorff.

Nous verrons, quand nous en serons aux applications de l'électricité, que les courants d'induction, en raison de leur nature statique et des commotions qu'ils fournissent, ont pu être employés avantageusement dans la médecine ; mais le problème à résoudre, dans un grand nombre de cas, était de régulariser tous ces courants et de disposer les éléments physiques qui leur donnent naissance, de telle manière qu'on pût obtenir un courant continu et permanent. C'est ce à quoi sont parvenus MM. Pixii, Saxton, Ruhmkorff, Breton frères, etc., et les machines ingénieuses qu'ils ont construites pour atteindre ce but ont été appelées *machines magnéto-électriques*.

Les courants d'induction jouent un rôle tellement important dans toutes les réactions électriques, qu'on peut dire qu'ils en sont la conséquence inséparable. Ainsi une hélice métallique dans laquelle circule un courant électrique, réagit sur elle-même en créant un courant d'induction qui donne à l'étincelle du courant voltaïque un plus grand éclat. Les courants d'induction réagissent à leur tour en créant d'autres courants d'induction d'un ordre inférieur, et ainsi de suite. Aussi l'étude de ces courants a-t-elle préoccupé à tel point les savants, que l'électricité magnétique constitue actuellement une des branches les plus importantes de la physique.

Il y a quelques années, M. Arago, occupé de recherches sur le magnétisme, fut tout étonné de reconnaître une influence exercée par l'aiguille aimantée sur des plaques métalliques, non magnétiques, placées à sa portée. Cette influence, quand les plaques étaient mises en mouvement au-dessous de son plan de déclinaison, se traduisait par un mouvement de rotation de cette aiguille, dont la rapidité

dépendait de la vitesse qui était imprimée aux plaques. M. Faraday expliqua immédiatement cet effet par l'induction exercée sur ces plaques par le courant magnétique, et cette explication fut, jusqu'à un certain point, justifiée par les expériences de MM. Nobili et Antinori qui, en faisant tourner rapidement un disque métallique sous l'un des pôles d'un fort aimant, reconnurent, dans le voisinage de ce pôle, la présence de quatre courants tous dirigés en sens contraire. Cependant de nouvelles expériences de M. Arago, sur ces effets du magnétisme de rotation lui ont fait penser qu'un phénomène plus complexe était en jeu dans cette action physique.

V.

DIVERSES CAUSES PRODUCTRICES DE L'ÉLECTRICITÉ.

Les causes susceptibles de développer l'électricité qui nous ont jusqu'à présent occupés sont : le *frottement*, les *réactions chimiques* et l'*induction*, exercée par les aimants ou l'électricité elle-même ; sur des corps conducteurs disposés en conséquence. Mais ces causes ne sont pas les seules, et la recherche des autres sources de l'électricité a, depuis la découverte de la pile de Volta, préoccupé beaucoup les savants. Il est résulté des différentes études qu'on a faites à ce sujet, que l'électricité pouvait être produite par le frottement de tous les corps entre eux, par la pression, le clivage, la capillarité, la chaleur, la lumière, la combustion, l'action vitale, la végétation et même les réactions à distance des corps entre eux, suivant qu'on les approche ou qu'on les éloigne les uns des autres.

Électricité produite par la chaleur, ou thermique.

Une des plus importantes découvertes dans ce genre de recherches fut celle des *courants thermo-électriques*, par Seebeck, de Berlin, en 1821. Ce savant physicien constata, en effet, que si l'on soude bout à bout deux métaux quelconques et que l'on maintienne les deux extrémités soudées à des températures différentes, il se manifeste un courant d'autant plus énergique que la différence des températures, qui est alors la cause productrice, est plus considérable, et que le nombre des soudures soumises à cette double action calorifique est plus grand. En soudant donc bout à bout, et dans le même ordre, un grand nombre de plaques de deux métaux différents et les repliant les unes au-dessous des autres, on a pu faire une pile thermo-électrique présentant de chaque côté des soudures de même ordre, et accumuler ainsi facilement de grands effets électriques avec les mêmes éléments calorifiques. Mais de tous les métaux qui, par leur juxtaposition, peuvent produire une pareille manifestation électrique, le bismuth et l'antimoine, le bismuth et le cuivre rouge, sont ceux qui produisent les effets les plus marqués et les plus intenses. C'est donc ces métaux qu'on a dû choisir pour la construction des piles thermo-électriques dont nous allons voir à l'instant les applications.

Quelle est la cause déterminante de la manifestation électrique dans les phénomènes thermo-électriques?.... C'est une question qui n'est pas encore parfaitement résolue. Les uns l'attribuent à l'inégalité du mouvement de la chaleur à travers des métaux de conductibilité différente; les autres prétendent que par l'effet d'une action calorifique inégale, il se détermine une réaction chimique qui entraîne avec elle la production des deux électricités. Quoi qu'il en soit, ces phénomènes présentent des anomalies tellement étranges,

quant au sens du courant résultant, qu'il est bien difficile de poser une théorie qui s'accorde avec tous les effets observés.

Si l'on réfléchit qu'en employant l'eau glacée et l'eau bouillante comme source calorifique différente, on peut obtenir, aussi longtemps qu'on le désire, une différence constante de température, on comprendra facilement que les courants thermo-électriques peuvent être d'une régularité parfaite et dont nuls autres courants ne sont susceptibles. Or, pour établir les lois des courants électriques, cette condition était indispensable. Aussi, n'est-ce qu'après la découverte de Seebeck que MM. Pouillet, Ohm, Feschenner, purent expérimenter d'une manière certaine et déduire les lois de conductibilité des métaux pour l'électricité, et les lois d'intensité des courants électriques, suivant leur grosseur, leur longueur, leurs dérivations et la composition des éléments métalliques ou non métalliques du circuit.

Puisqu'un courant thermo-électrique est d'autant plus intense que la différence de température est plus considérable, on conçoit qu'en approchant d'un côté des soudures d'une pile thermo-électrique une source calorifique quelconque, il se manifeste un courant dont l'intensité, constatée par le galvanomètre, représente en quelque sorte le degré de chaleur de la source présentée à la pile. Or, comme en multipliant les éléments de cette pile on peut augmenter autant que l'on veut sa sensibilité, il a été facile de construire des thermomètres électriques d'une sensibilité extraordinaire. C'est à l'aide de ce genre de thermomètres que M. Melloni a pu constater les effets de polarisation de la chaleur.

En cherchant la réciproque de la manifestation électrique dans les piles thermo-électriques, c'est-à-dire en faisant passer un courant voltaïque à travers une pile thermo-électrique, M. Peltier a trouvé non-seulement que les soudures

d'un côté de la pile étaient à une température différente de celles du côté opposé, ce qui établissait bien la réciproque de la manifestation électrique-thermique, mais encore, qu'au lieu de développer de la chaleur, comme dans les circuits ordinaires, le courant motivait un refroidissement quand il passait du bismuth à l'antimoine. Ce fait excessivement curieux prouve que dans les piles thermo-électriques le sens du courant peut dépendre du côté où agit la source calorifique la plus chaude.

La juxtaposition de deux métaux différents soudés bout à bout, n'est pas une condition indispensable pour la création de courants thermo-électriques. M. Adie a constaté, en effet, qu'une simple différence de densité entre deux morceaux soudés d'un même métal, tels par exemple qu'un morceau d'acier trempé dur et un morceau d'acier écroui, suffit pour les faire naître. Par la même raison, lorsqu'on chauffe ou qu'on refroidit quelques points d'un circuit métallique fermé et composé d'un seul métal homogène, on y détermine, sous certaines conditions, des courants plus ou moins énergiques dont le sens est variable.

La chaleur agit encore, mais d'une manière différente, sur certains cristaux, et, en particulier, sur la tourmaline, comme cause productrice de l'électricité. La constatation de ce fait n'est pas nouvelle, mais, depuis près de cent ans, elle exerce la sagacité des physiciens par les effets bizarres qui se manifestent. Ainsi, une tourmaline n'est susceptible d'être électrisée par la chaleur qu'entre les limites 10° et 150°; au delà ou en deçà, elle se comporte comme les autres corps. Une chose assez particulière, c'est que les deux électricités prennent naissance à la fois et constituent, aux deux extrémités du plus grand diamètre de la pierre, deux pôles qui agissent à la manière des aimants, mais qui semblent dépendre du changement de température, de telle sorte qu'à une température donnée, une tourmaline peut

se présenter sous trois états différents : à l'état naturel, si elle a été maintenue longtemps à cette température ; avec ses pôles, par échauffement, si elle y arrive en s'échauffant ; enfin, avec ses pôles, par refroidissement, si elle y arrive en se refroidissant.

Tout récemment M. Ed. Becquerel a démontré que, de même que la chaleur pour les courants thermo-électriques, la lumière peut agir comme excitant dans la création de courants électriques qui se développent sur les substances photographiques au moment où celles-ci se trouvent impressionnées. Ces courants ainsi produits sont persistants et dirigés dans un sens différent, suivant la nature des substances impressionnables qu'on emploie.

Électricité développée par une action mécanique.

Le frottement exercé sur les corps non conducteurs qui, dans l'étude spéciale que nous avons faite de l'électricité statique, a été considérée comme la seule et unique cause productrice de l'électricité, n'est pas le seul moyen d'obtenir mécaniquement cet agent physique : deux corps solides *quelconques* prennent toujours de l'électricité par le frottement, l'un l'électricité résineuse, l'autre l'électricité vitrée, lorsqu'on prend toutefois les précautions convenables pour les sécher et pour les isoler ; toutefois, l'état des surfaces de ces corps, leur température et la nature du corps frottant, leur donne une prédisposition plus ou moins prononcée pour prendre l'une ou l'autre des deux électricités, et il paraîtrait, d'après les expériences de M. Gauguin, que le phénomène électrique n'aurait d'autre cause dans cette circonstance qu'une manifestation thermo-électrique.

Le frottement des liquides entre eux ou contre les corps solides peut également produire de l'électricité ; mais, de toutes ces réactions électriques dues au frottement, la plus

remarquable et la plus puissante est celle qui résulte de l'échappement d'un jet de vapeur à haute tension contre un peigne métallique isolé. Dans ce cas, la production d'électricité est telle qu'on peut tirer de la chaudière ou du peigne métallique des lames de feu d'une certaine longueur; mais il faut pour cela que la chaudière soit isolée sur des pieds de verre, et que les ajutages par lesquels sort la vapeur aient une forme particulière. Un appareil ainsi disposé est certainement plus puissant que la plus forte des machines à plateau de verre; il a été inventé par M. Armstrong, mécanicien anglais, en 1840.

C'est le physicien Libes qui constata le premier que la *pression* pouvait développer, dans certains corps, de l'électricité. Mais comme ses expériences pouvaient faire attribuer au frottement cette propriété, c'est, par le fait, à Haüy qu'il faut rapporter les recherches les plus importantes faites à ce sujet. Il trouva, en effet, qu'en pressant certains cristaux non-seulement ils s'électrisaient, mais encore qu'ils pouvaient conserver pendant quelque temps leurs propriétés électriques. La chaux carbonatée est, sous ce rapport, la substance la plus remarquable. Elle possède une telle force conservatrice qu'après avoir été pressée un instant, elle donne encore au bout de onze jours des signes électriques sensibles. Du reste, la nature de l'électricité ainsi développée sur ces cristaux dépend beaucoup de celle des corps qui pressent.

M. Becquerel a construit un grand appareil pour étudier ces phénomènes, et il a conclu que la quantité des fluides dégagés est proportionnelle à la pression; mais cette opinion a été contestée. Quoi qu'il en soit, cet habile physicien a démontré que le *clivage* était aussi une cause de développement électrique dans les cristaux, et que deux lamelles cristallines, en se détachant l'une de l'autre, se trouvaient chargées chacune d'une électricité différente.

Par des expériences récentes, M. Ed. Becquerel a constaté que deux lames de même métal ou de même substance conductrice, oxydable ou non oxydable, et un liquide conducteur, peuvent constituer un couple voltaïque, pourvu que l'une d'elles soit en mouvement dans la masse liquide. Quand les métaux ou substances employées sont peu ou point oxydables, la lame mobile prend l'électricité négative et la lame fixe l'électricité positive, tandis que le contraire a lieu quand les lames polaires sont oxydables. Le même effet se reproduit quand, au lieu d'agiter l'une des lames, on agite le liquide autour de l'une d'elles. Ainsi, on peut avoir un dégagement d'électricité résultant de la chute d'une veine liquide dans un vase, en disposant l'expérience de façon qu'une des lames seule soit entourée de molécules en mouvement ; et l'effet est encore plus sensible si le liquide contient des corps conducteurs et même non conducteurs réduits en poudre.

Des effets analogues, mais de moindre intensité, se reproduisent également quand les deux lames sont en mouvement dans le liquide ; mais le dégagement électrique n'est dû, dans ce cas, qu'à la différence des actions exercées sur ces lames. M. Ed. Becquerel croit que ces effets sont dus partie au frottement, partie à des effets de polarisation plus ou moins compliqués.

Électricité développée par les réactions chimiques.

Nous avons déjà dit qu'une réaction chimique avait pour effet physique un dégagement d'électricité, que les corps électro-négatifs dégageaient de l'électricité positive au moment de leur combinaison, et avaient besoin de la reprendre pour redevenir libres, tandis que l'inverse avait lieu pour les corps électro-positifs. Ces réactions, qui se manifestent doublement dans les piles à deux liquides, ne

sont pas les seules qui peuvent produire à la fois les deux électricités : l'action des acides sur les alcalis, les solutions alcalines ou acides, enfin les dissolutions salines dans lesquelles un métal prend la place d'un autre métal, sont autant de causes productrices de l'électricité. Mais, dans toutes ces combinaisons, c'est toujours l'élément acide qui dégage l'électricité positive, et l'élément basique l'électricité négative.

La combustion est une réaction chimique, et, par conséquent, un dégagement électrique doit en être la suite ; mais pour pouvoir constater ce fait, reconnu pour la première fois par M. Pouillet, il faut prendre plusieurs précautions qui sont indispensables : on s'assure alors que le corps combustible s'électrise négativement, tandis que la flamme, l'hydrogène carboné ou l'acide carbonique qui se dégagent, sont électrisés positivement.

Électricité animale.

Si l'on considère que tous les appareils sécrétoires des animaux fournissent des produits qui sont alternativement acides et alcalins, on pourrait croire que, dans certaines circonstances, les réactions chimiques qui peuvent s'opérer à travers le tissu cellulaire devraient donner lieu à des courants électriques. Ces courants existent en effet, comme l'ont démontré MM. Donné et Matteucci, mais leur existence est tellement liée à l'état électrique des surfaces des organes, et cet état électrique est dans un tel rapport avec la vie, que l'on peut en conclure que si les fonctions sécrétoires de l'économie animale sont ou déterminées, ou accompagnées par des courants électriques, ceux-ci cessent avec la vie.

Chez certains poissons, tels que les torpilles, les gymnotes et les silures, ces courants sont de nature statique et

si intenses, qu'ils produisent des commotions souvent plus énergiques que celles des plus fortes bouteilles de Leyde. Mais ils résident dans un organe particulier qui a des rapports frappants avec la pile de Volta, et la commotion qui en est la conséquence est pour ces poissons un phénomène volontaire.

C'est à M. Walsch que nous devons les premières recherches un peu précises sur les effets électriques de ces singuliers animaux. Ses expériences furent faites à La Rochelle, en 1772. Depuis lui, beaucoup de physiciens et, entre autres, MM. Becquerel, Breschet et Matteucci ont fait de nouvelles études et sont parvenus à obtenir l'étincelle électrique dont la présence n'avait pu jusque-là être accusée. Ils ont reconnu également que le courant électrique marchait toujours du dos au ventre, mais que le poisson pouvait faire passer la décharge par tels ou tels points de ses surfaces supérieures et inférieures.

Électricité dégagée par les végétaux.

En faisant germer des plantes dans des capsules isolées et au milieu d'une atmosphère suffisamment sèche, il a été possible à M. Pouillet de recueillir les électricités qui se développent dans l'acte de la végétation, et il a pu reconnaître, par leur nature, la confirmation des lois des réactions chimiques dont nous avons parlé.

Électricité développée par les réactions physiques.

Puisque les réactions chimiques et les actions mécaniques développent de l'électricité, il est à supposer que les réactions physiques elles-mêmes doivent provoquer un semblable effet. Mais la difficulté d'isoler, dans les expériences, ces réactions les unes des autres, fait qu'on n'a pu jusqu'à

présent bien préciser les conditions des dégagements électriques observés. Toutefois nous avons pu voir, par les phénomènes thermo-électriques, l'action puissante qu'exerce la chaleur sur la production de l'électricité.

D'après M. Becquerel, il paraîtrait que l'action capillaire serait une cause productrice de l'électricité, aussi bien que le contact d'une nappe d'eau avec les terres. Dans ce dernier cas, la terre prendrait un excès notable d'électricité négative, tandis que l'eau prendrait un excès correspondant d'électricité positive. Ce phénomène, d'après M. Becquerel, pourrait même entrer pour beaucoup dans la création de l'électricité atmosphérique.

D'un autre côté, les expériences de M. Raoult prouvent que les courants électriques peuvent réagir sur certains phénomènes physiques, particulièrement sur l'endosmose des liquides. Enfin, si l'on se rappelle que la lumière a pu développer du magnétisme dans des aiguilles d'acier trempé, et que le magnétisme lui-même peut dévier le plan de polarisation d'un rayon de lumière polarisé, on pourra s'assurer que les réactions physiques, comme les réactions chimiques et les réactions mécaniques, doivent participer à la création de l'électricité.

Des expériences toutes nouvelles faites par M. Palagi sembleraient aussi prouver que les influences relatives des corps entre eux détermineraient un dégagement électrique, c'est-à-dire qu'en avançant un corps vers un autre qui serait fixe, on le chargerait d'électricité positive, tandis qu'en l'éloignant on déterminerait sur lui une charge d'électricité négative. Ce fait a été, de la part de MM. Volpicelli, Secchi et autres, l'objet de nombreuses dissertations dans lesquelles nous n'entrerons pas.

VI.

TRANSMISSION DE L'ÉLECTRICITÉ.

Vitesse de l'électricité.

Otto de Guericke et principalement Gray et Whoeler remarquèrent les premiers que l'électricité se propageait avec une grande vitesse, mais aucunes expériences n'avaient été tentées par eux pour apprécier, même grossièrement, quelle pouvait être cette vitesse. Watson, physicien anglais, fut le premier qui entreprit, à ce sujet, des recherches sur une grande échelle. Mais il n'obtint d'autre résultat de ses expériences que la confirmation du fait déjà connu.

En 1828, M. Arago, dans son intéressant article sur le tonnerre, démontra, au moyen d'un appareil fort simple, que les éclairs les plus brillants, les plus étendus, même ceux qui paraissent développer leurs feux sur toute l'étendue de l'horizon visible, n'ont pas une durée égale à la *millième partie d'une seconde de temps*. Bien que ce résultat ait pu donner une idée de la prodigieuse vitesse de transmission de l'électricité, il ne pouvait encore satisfaire les savants, car la limite minimum de cette vitesse n'avait pu être constatée, et il était probable qu'elle était encore bien éloignée. On s'appliqua dès lors à perfectionner les instruments et les procédés d'expérimentation; mais ce ne fut qu'en 1834 que M. Wheatstone, au moyen d'un appareil fort ingénieux qu'il inventa, résolut en partie le problème. Ses conclusions furent :

1^o Que la vitesse de l'électricité dans un fil de cuivre est au moins aussi grande que celle de la lumière dans l'espace planétaire ;

2° Que dans un fil qui communique par ses extrémités avec les deux armures d'une bouteille de Leyde, le dérangement d'équilibre électrique se propage avec une vitesse égale à partir des deux bouts du fil et n'arrive que plus tard au milieu du circuit ;

3° Que la lumière électrique, à l'état de haute tension, dure moins de $\frac{1}{4,000,000}$ de seconde ;

4° Que l'œil est capable de voir distinctement les objets qui lui sont présentés pendant ce court intervalle de temps.

Toutefois, comme M. Wheatstone n'avait pas opéré directement sur le courant électrique et que ses recherches avaient porté principalement sur l'électricité de tension dégagée dans un milieu aériforme ; plusieurs physiciens, entre autres MM. Fizeau et Gounelle cherchèrent à étudier ces lois de propagation du fluide électrique dans les corps solides métalliques, c'est-à-dire dans les circuits voltaïques. Or, voici les résultats auxquels ils sont parvenus, en opérant sur une longueur de 600 kilomètres :

1° Dans un fil de fer, dont le diamètre est de quatre millimètres, l'électricité se propage avec une vitesse de 101,710 kilomètres, en nombre rond de 100,000 kilomètres par seconde.

2° Dans un fil de cuivre dont le diamètre est de $2\frac{7}{8}$, cette vitesse est en nombre rond 180,000 kilomètres par seconde.

3° Les deux électricités se propagent avec la même vitesse.

4° Le nombre et la nature des éléments dont la pile est formée, et par conséquent la tension de l'électricité et l'intensité du courant, n'ont pas d'influence sur la vitesse de propagation.

5° Dans les conducteurs de différente nature la vitesse augmente bien avec le degré de conductibilité des métaux, mais dans un rapport qui n'est pas proportionnel.

6° La vitesse de propagation ne paraît pas varier avec la section des conducteurs.

Il serait, sans doute, intéressant de décrire les instruments avec lesquels les habiles physiciens dont nous venons de parler ont pu arriver à des résultats aussi curieux et aussi importants ; mais, de crainte d'être obscur, je me contenterai d'en indiquer le principe. Un charbon brûlant que vous faites tourner rapidement autour de vous, les raies d'une roue qui se meut avec rapidité, ne peuvent être perçus isolément dans leurs différentes positions. Dans le premier cas, vous apercevez un ruban de feu, dans le second, une surface unie et tournante, et cela, parce que l'impression de la lumière sur l'œil n'est pas instantanée et qu'elle persiste quelques instants (un dixième de seconde environ) après la cessation de l'action lumineuse. Mais si la cause éclairante est *instantanée*, on conçoit qu'elle saisira l'objet en mouvement dans une seule de ses positions, et devra le faire voir comme s'il était en repos. Plus le mouvement sera rapide, plus il faudra que l'apparition lumineuse soit prompte pour arriver à un pareil résultat. Or, en faisant tourner dans un lieu complètement obscur un disque de couleur blanche sur lequel étaient peints des rayons noirs, et éclairant ce disque avec la lumière produite par un éclair, M. Arago s'assura que les rayons noirs paraissaient toujours aussi distincts que si le disque eût été dans une position fixe, et quelque vitesse dont celui-ci fût d'ailleurs animé. En calculant alors, d'après la vitesse maximum imprimée à ce disque, la promptitude de l'apparition lumineuse, il trouva, comme nous l'avons déjà dit, qu'elle était au-dessus de un millième de seconde.

Comme les moyens mécaniques ne pouvaient suffire à eux seuls, et que, d'ailleurs, l'espace parcouru par un éclair aurait toujours été très-hypothétique, M. Wheatstone, en 1834 et 1836, employa un fil d'une longueur connue et

disposé de manière à exciter de la part d'une bouteille de Leyde à ses deux bouts et en son milieu trois étincelles pour une même décharge. Les boules métalliques entre lesquelles s'échangeaient ces étincelles étaient toutes placées sur une même ligne droite, et assez rapprochées les unes des autres pour que les trois étincelles pussent être réfléchies par un miroir et projetées ensuite sur un très-grand écran disposé à cet effet. Le fil du circuit, long d'environ deux milles et soigneusement recouvert de soie et de gomme laque, était tendu dans toute la longueur de caves spacieuses et soutenu de distance en distance par des fils de soie. Enfin, le miroir sur lequel se réfléchissaient les étincelles était double et pouvait être, à l'aide d'un mécanisme d'horlogerie, animé d'un mouvement de 800 tours par seconde.

Avec cette disposition, on comprend aisément que le miroir, en tournant, pouvait saisir à la fois les trois décharges sous diverses inclinaisons, et devait, par cela même, allonger leur projection lumineuse sur l'écran dans une proportion d'autant plus grande que leur apparition était moins instantanée. De plus, la hauteur de ces projections elles-mêmes sur l'écran, devait dépendre de l'instant précis de l'apparition de ces étincelles. Or, en faisant cette expérience, M. Wheatstone s'assura que non-seulement les projections des étincelles se trouvaient allongées, ce qui supposait à leur apparition une durée appréciable, mais encore que la projection de l'étincelle correspondant à la décharge du milieu du circuit n'était pas sur la même ligne droite que les projections des deux autres décharges. En calculant l'angle correspondant à cette différence d'alignement dans ces projections, et rapportant cet angle à la durée d'un tour complet accompli par le miroir réflecteur, M. Wheatstone put déduire la fraction de seconde employée par la décharge à parcourir la moitié du circuit. Or, cet angle, dans les conditions de l'expérience, n'était que d'un demi-degré, de sorte

que la durée de la transmission dans le trajet d'un mille, n'avait été que la sept-cent-vingtième partie d'un huit-centième de seconde.

D'après ce calcul, la vitesse de l'électricité serait de 576,000 milles anglais ou 192,800 lieues dans une seconde de temps. Du reste, M. Wheatstone, dans les expériences qu'il entreprit alors, n'avait pas l'intention de donner un chiffre exact pour cette vitesse; il voulait simplement démontrer que l'électricité avait une vitesse appréciable et fixer la limite maximum de cette vitesse. On comprend, en effet, que les appareils qu'il dut employer dans ces expériences, n'étaient pas assez perfectionnés pour qu'il pût songer alors à une appréciation plus minutieuse.

L'appareil de M. Fizeau est aussi simple; il se composait principalement de deux interrupteurs de courant, c'est-à-dire de deux roues, dont la circonférence était composée de parties conductrices et non conductrices, sur lesquelles venait s'appuyer un ressort en rapport avec le courant. Ces deux interrupteurs étaient placés aux deux extrémités d'un fil de ligne télégraphique doublé, et un galvanomètre très-sensible était interposé dans le circuit.

Comme ces interrupteurs étaient en relation avec un système moteur susceptible de leur donner à volonté une vitesse aussi grande qu'on pouvait le désirer, ils pouvaient, à partir d'un instant donné, interrompre le courant d'une manière qui aurait été concordante, si, marchant avec la même vitesse, la transmission électrique eût été instantanée, mais qui devait être discordante dans le cas contraire. Ainsi, dans ce dernier cas, le courant étant interrompu à Paris, je suppose, ne devait pas l'être à Amiens dans le même instant et réciproquement. Mais si, au lieu d'avoir des vitesses égales, les interrupteurs eussent été animés d'une vitesse différente, il aurait pu se faire que la différence des vitesses compensât le retard occasionné par la

transmission du fluide et que les deux interruptions se fussent manifestées dans le même temps, circonstance qui pouvait être accusée par le galvanomètre. Or, dans ce cas, la différence de vitesse de l'appareil moteur pouvait servir à la détermination de la vitesse de l'électricité. Tel est le principe sur lequel M. Fizeau a basé ses expériences, principe vrai en lui-même, mais qui exige une perfection d'instruments et d'expérimentation dont peu de personnes sont susceptibles. Aussi n'est-ce qu'après vingt-huit expériences que l'habile physicien dont nous parlons a pu constater les beaux résultats que nous avons enregistrés précédemment.

Conducteurs des courants.

Jusqu'à présent, nous n'avons considéré que des conducteurs métalliques homogènes, et nous avons vu que, d'après les lois de Ohm, l'intensité électrique croissait en les parcourant proportionnellement à leur section et en raison inverse de leur longueur. Mais bien des considérations ont dû entrer en ligne de compte, quand il a fallu les établir en grand pour la télégraphie électrique. On a dû chercher : 1^o comment on pouvait calculer la puissance électrique à donner par rapport à la résistance à vaincre ; 2^o quel procédé on devait employer pour augmenter le plus économiquement la force électrique ; 3^o quelle était la manière la plus avantageuse d'établir les dérivations si nécessaires dans le service de la télégraphie électrique ; 4^o enfin, comment on pouvait établir d'une manière peu dispendieuse les conducteurs des grandes lignes.

Ces différentes questions, dictées par la nécessité de l'application, ont été la cause d'une foule de découvertes importantes qui ont été réalisées depuis quelques années.

M. Wheatstone, dans son admirable travail sur la détermination des constantes des circuits voltaïques, a résolu, de

la manière la plus catégorique et la plus complète, les deux premières de ces questions ; et au moyen de ses formules, on peut maintenant calculer la force électrique à donner à une ligne télégraphique, comme on calcule la force d'une machine à vapeur.

Un fait excessivement curieux qui ressort de la théorie de M. Wheatstone et qui aurait pu paraître impossible sans les considérations dans lesquelles il est entré et les expériences qu'il a faites pour les démontrer, c'est que pour vaincre la résistance apportée par les conducteurs d'un circuit voltaïque, la grandeur des éléments de la pile est insignifiante ; toute la force dépend de leur nombre. C'est pourquoi M. Read, au grand étonnement de ceux qui ne connaissaient pas les lois de Wheatstone, a pu faire fonctionner le télégraphe sous-marin de Douvres à Calais avec une pile de $3\frac{1}{4}$ de pouce.

Ainsi une pile qui peut avoir sa force augmentée, soit par la réunion de plusieurs éléments unis par leurs pôles contraires, soit par l'agrandissement de sa surface, que l'on peut obtenir avec plusieurs éléments distincts, si on les réunit par leurs pôles semblables, exerce un effet complètement différent dans les deux cas. Avec une pile à grande surface, tout le développement de l'électricité se fait en un seul point, et l'action électrique est alors très-énergique sur une petite longueur, pourvu que le fil soit suffisamment gros : c'est de l'électricité de quantité. Avec une pile composée de plusieurs éléments distincts, l'électricité peut vaincre facilement la résistance apportée par le fil et peut agir à de grandes distances : c'est alors de l'électricité de tension.

C'est en expérimentant les différents résultats que lui avait fournis sa théorie que M. Wheatstone découvrit son *rhéostat*, instrument parfait, au moyen duquel on peut mesurer, de la manière la plus rigoureuse, la résistance apportée à un courant par son circuit.

Conductibilité de la terre.

Les premières recherches sur la conductibilité de la terre remontent à l'année 1747. A cette époque, le docteur Watson qui, par des expériences préalables sur la Tamise, avait reconnu le pouvoir conducteur des liquides, s'imagina de faire entrer la terre pour moitié dans un circuit parcouru par une décharge électrique, et s'assura que dans un circuit ainsi composé comme dans un circuit entièrement métallique, la transmission électrique était instantanée. Les expériences qu'il entreprit à cet égard furent faites successivement avec des fils de 45 mètres, de 1609 mètres et de 3218 mètres de longueur, et toujours la réussite fut complète. Ces expériences furent ensuite répétées par MM. Franklin, de Luc, Lemonnier et l'abbé Nollet, mais elles n'ajoutèrent rien à la découverte du savant anglais.

Après la découverte de la pile de Volta, plusieurs savants, entre autres MM. Erman, Basse (de Berlin) et Aldini, cherchèrent à répéter en 1803, avec les courants voltaïques, les expériences que Watson avait faites avec des décharges d'électricité statique; ils reconnurent que le phénomène de la propagation du courant s'opérait de la même manière, mais sous certaines conditions. M. Feschner prétendit même que l'on pouvait utiliser cette propriété de transmission du sol dans *la télégraphie électrique*. Il est vrai qu'à cette époque cette question de la télégraphie était loin d'être résolue. Mais une chose curieuse à constater, c'est que tous ceux qui se sont occupés, dans le commencement du siècle actuel, de réaliser cette belle idée, ne cherchèrent pas à appliquer à leur système cette propriété si importante de la transmission par le sol, qui était partout découverte depuis longtemps. Ce n'est qu'en 1838 que M. Steinheil, physicien allemand, eut l'idée d'en tirer parti pour un télégraphe

électrique qu'il avait imaginé. Ses expériences furent faites à Munich, sur un circuit d'une lieue trois quarts d'Allemagne; il s'assura qu'effectivement la terre pouvait *transmettre* le courant électrique si le fil conducteur, qu'il appelait *fil d'aller*, se terminait à son extrémité libre par une plaque enterrée dans le sol et que la pile fût elle-même en rapport avec le sol de la même manière. D'autres expériences lui prouvèrent ensuite que cette faculté de transmission de la terre était d'autant plus grande que les plaques avaient elles-mêmes plus de surface et que le terrain était plus humide. Cette découverte était une véritable révélation, car elle permettait d'épargner sur toutes les lignes télégraphiques le fil de *retour* et de réduire de moitié leur dépense d'installation. Aussi, tous les physiciens se mirent-ils à l'œuvre pour étudier les conséquences qui pouvaient résulter de cette question nouvelle. MM. Wheatstone et Cooke firent, en 1841, des essais qui eurent pour résultat d'établir que la terre agissant comme un grand réservoir d'électricité ou sous quelques rapports comme un excellent conducteur, la résistance offerte par elle à la transmission du fluide électrique est grandement diminuée, de sorte que la pile peut agir à une bien plus grande distance avec un fil conducteur d'un plus petit diamètre.

Ce fait était déjà d'une grande importance, car il prouvait que la terre, loin d'être un plus mauvais conducteur que le fil métallique, favorise au contraire la marche du courant, surtout quand la longueur du circuit est considérable.

La propriété de transmission du sol ayant été reconnue, comme nous l'avons dit précédemment, plusieurs savants voulurent s'assurer si en faisant intervenir la terre comme intermédiaire humide dans un couple voltaïque dont les éléments seraient très-écartés l'un de l'autre, on ne pouvait pas obtenir des courants électro-telluriques à travers un circuit qui ne serait en communication avec aucune pile,

C'est au professeur Kemp, d'Édimbourg, que l'on doit les premières recherches qui ont été faites à ce sujet. Ce savant imagina, en 1828, de plonger dans la mer, à un demi-mille de distance l'une de l'autre, deux grandes plaques zinc et cuivre, qu'il réunit par un fil suffisamment isolé sur le rivage. En interposant au milieu de ce fil un galvanomètre, il put s'assurer qu'un courant assez énergique le parcourait dans sa longueur. Peu de temps après, M. Fox, de Falmouth et M. Reich, de Freyburg, répétèrent ces expériences en substituant la terre à l'eau de mer. Pour cela ils enterrèrent à une certaine distance l'une de l'autre leur plaque de zinc et leur plaque de cuivre, et en unissant les deux plaques ils trouvèrent exactement les mêmes effets; de sorte qu'ils purent conclure que la terre, dans cette circonstance, jouait le rôle du sable humecté dans une pile à sable ordinaire composée d'un seul élément.

Cette découverte très-curieuse fut bientôt suivie d'une autre plus curieuse encore. M. Magrini, en effet, démontra par de nombreuses expériences faites sur le chemin de fer de Milan à Monza que la présence d'une simple plaque enterrée suffisait pour produire un courant dans un fil librement suspendu à l'air libre, et, par conséquent, que des plaques d'un métal différent n'étaient indispensables que dans le cas où on les employait simultanément, parce qu'alors les courants, produits séparément par chacune d'elles, étaient dirigés en sens contraire, et qu'au lieu de se neutraliser dans le conducteur commun ils ne faisaient que s'ajouter. Il remarqua, en outre, que la source de pareils courants se comportait en quelque sorte comme une source calorifique, car leur intensité décroissait à partir de la plaque enterrée jusqu'à une certaine limite après laquelle la différence ne pouvait plus être appréciée, mais qui pouvait être éloignée par l'allongement du fil ou la réunion de plusieurs fils.

Une propriété assez extraordinaire de ces sortes de courants auxquels M. Magrini a donné le nom de *courants telluriques*, c'est que leur direction est inverse de celle qui devrait être constatée si le zinc et le cuivre qui forment les extrémités du fil constituaient un couple voltaïque, d'où il résulte que notre planète serait l'électro-moteur le plus négatif de tous les métaux, le zinc excepté, en ce sens qu'il pousserait le fluide dans les autres métaux et le recevrait du zinc.

Quoi qu'il en soit de l'origine de ces courants que M. Magrini regarde comme issus d'une pile à la Bagation, constituée par le globe terrestre, il n'en est pas moins certain que l'interposition de la terre dans un circuit est d'autant plus avantageuse que le circuit lui-même est plus long; car, comme l'a observé M. Matteucci dès 1844, la résistance de la terre étant un chiffre constant, elle est la même pour une petite distance comme pour une grande, et les courants telluriques venant s'ajouter à l'action de la pile diminuent encore cette résistance. Plusieurs savants vont même jusqu'à prétendre qu'elle est tellement faible qu'elle peut être négligée, et que conséquemment l'intensité du courant dans un circuit *mixte*, c'est-à-dire un circuit dans lequel la terre entre pour moitié, est double de ce qu'elle serait dans un circuit métallique complet.

Quel rôle la terre joue-t-elle dans cette transmission de l'électricité?... C'est une question sur laquelle l'opinion des sayants est bien partagée en ce moment. Les uns veulent qu'elle remplisse le rôle d'un simple conducteur, dont la mauvaise conductibilité serait compensée par l'immensité de la section; d'autres, avec plus de raison, comme on le verra plus tard, regardant la terre comme un vaste réservoir, une espèce de puisard, prétendent qu'elle est une issue pour l'électricité produite par la pile, et que par cela même que cette électricité se perd ou s'écoule, il y a production

d'un courant électrique. Quoi qu'il en soit, cette transmission de l'électricité peut se faire à travers tous les terrains, dans les pays de montagnes comme dans les plaines, mais il est toujours plus avantageux de placer, quand on le peut, dans des puits remplis d'eau, les plaques qui terminent le fil métallique.

Tout récemment, plusieurs expériences combinées par M. Van Rees et répétées à Portsmouth, ont fait croire un moment que le problème de la transmission des courants sans l'intervention de fils conducteurs était résolu. Ainsi on a pu, à travers une rivière assez large, faire fonctionner un télégraphe électrique sans qu'aucun fil eût été interposé entre les appareils. Pour cela, on établissait sur l'une des rives, entre le pôle positif de la pile (fig. 1, pl. 1) et la rivière, une communication métallique à l'aide d'une plaque de cuivre A; l'autre pôle de la pile était en rapport avec l'interrupteur du courant I, et celui-ci communiquait lui-même avec la rivière par une deuxième plaque de cuivre B. Sur l'autre rive se trouvait l'appareil télégraphique T, dont l'organe électrique était en communication avec la rivière par deux plaques de cuivre C et D très-écartées l'une de l'autre. Au moment où l'on faisait fonctionner l'interrupteur, l'appareil télégraphique fournissait les signaux voulus.

L'explication de cette transmission électrique est facile, car elle résulte d'une simple dérivation de courant. En effet, le courant transmis à la rivière par les plaques A et B est complété de A en B par le conducteur liquide; mais trouvant par les plaques C et D une autre issue CDT, il se dérive et réagit sur l'appareil T. Toutefois, comme ce dernier courant passe par un circuit plus long que celui qui va de A en B, il est très-affaibli, et pour une distance un peu longue, il est complètement annihilé. C'est pourquoi cette découverte, très-curieuse en elle-même, n'a pas eu d'application dans la télégraphie.

LIVRE II

ÉTUDE DES MOYENS

ET

DES COMBINAISONS ÉLECTRIQUES

SUSCEPTIBLES D'ÊTRE EMPLOYÉS

DANS LES

APPLICATIONS MÉCANIQUES ET PHYSIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ

Au premier abord, quand on considère les mécanismes et les moyens physiques employés dans les applications de l'électricité, on s' imagine qu'il suffit de savoir ce que c'est qu'une pile, un électro-aimant, un galvanomètre et un commutateur de courant, pour être en état de créer toutes les combinaisons électro-mécaniques possibles. Je dois même dire que c'est l'opinion de la majeure partie des savants qui s'occupent de physique pure et de sciences théoriques; c'est sans doute aussi la raison pour laquelle l'Académie des Sciences se montre si sobre de rapports sur les applications de l'électricité qu'on lui présente tous les jours, et ne fait jamais que mentionner le titre de ces découvertes (car, on a beau faire, ce sont des découvertes) dans les recueils

qu'elle publie. Il en est pourtant tout autrement, et si l'on pouvait mesurer la dose de science et d'intelligence dépensée par ceux qui appliquent et ceux qui trouvent le principe des applications scientifiques, on verrait que la balance ne pencherait pas toujours d'un seul côté.

Pour pouvoir bien appliquer l'électricité, une foule de connaissances préalables sont indispensables. Non-seulement il faut connaître parfaitement tous les moyens fournis par la mécanique, la physique et la chimie, mais il faut encore qu'on ait étudié et expérimenté longtemps les caprices si bizarres, et quelquefois les anomalies si complexes du fluide électrique; il faut avoir beaucoup vu, beaucoup comparé et beaucoup travaillé soi-même de ses propres mains. Ce n'est qu'à ces conditions qu'un inventeur, soit constructeur, soit amateur, soit savant, peut réussir dans ses découvertes et *être bon juge des inventions des autres*. Par les notions préliminaires que je vais exposer dans cette première partie de mon ouvrage et qui sont loin encore de comprendre tous les renseignements que l'expérience acquise peut fournir, on pourra s'assurer de la multiplicité des connaissances nécessaires pour tout inventeur qui veut créer quelque chose de nouveau.

I.

DISPOSITIONS DIVERSES DES PILES.

Depuis l'époque de sa découverte, la pile de Volta a subi, comme je l'ai déjà dit, de nombreuses et importantes modifications; mais de toutes ces modifications, de tous ces perfectionnements, nous ne considérerons que ceux apportés aux piles à courants constants, les seules qui, selon nous, doivent être employées dans les applications physiques et mécaniques de l'électricité. Toutefois, avant de nous en

occuper exclusivement, nous allons entrer dans quelques détails théoriques qui en faciliteront considérablement la compréhension.

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES.

Mode de développement électrique dans les réactions chimiques. — Tous les corps, et, par suite, toutes leurs molécules, possèdent les deux électricités à l'état de neutralisation réciproque. C'est un fait reconnu depuis près d'un siècle et qui n'a pas encore été contesté, quelque origine d'ailleurs qu'on suppose à ces fluides, que l'électricité négative se manifeste par suite de l'absence de l'électricité positive ou qu'elle soit réellement un fluide différent de cette dernière. D'après ce principe, il doit s'ensuivre que si deux corps ayant *affinité* l'un pour l'autre sont en présence, leurs molécules, en se combinant successivement deux à deux, doivent avoir leur équilibre électrique rompu au moment de leur transformation. Or, tandis qu'un nouvel équilibre électrique, en rapport avec le nouveau corps formé, s'établit entre deux systèmes électriques différents, obligés de se reconstituer en un seul, il doit se produire une double manifestation électrique que l'on peut regarder, jusqu'à un certain point, comme le résultat du dégagement des deux électricités qui se sont trouvées en excès dans la combinaison et dont la présence peut être accusée sur les corps appelés à se combiner, si toutefois ceux-ci sont conducteurs. Par contre, si un corps se décompose en deux éléments distincts, ceux-ci doivent emprunter aux corps conducteurs qui sont en contact avec eux les électricités qui leur sont nécessaires pour recomposer leur électricité naturelle et qu'ils avaient abandonnées au moment de leur combinaison primitive. Donc, dans une décomposition chimique comme dans une combinaison, il y a dégage-

ment d'électricité; mais, dans les deux cas, la manifestation électrique se fait d'une manière inverse.

La nature de l'électricité ainsi dégagée par les corps au moment de leur combinaison, dépend de la nature même de ces corps. Avec l'oxygène et les acides en général, c'est l'électricité positive qui devient libre au moment de leur *combinaison*, et le corps avec lequel ils se combinent dégage de l'électricité *negative*. Au contraire l'hydrogène et la plupart des oxydes ou bases salifiables laissent en liberté l'électricité *negative*. Alors les corps avec lesquels ils se combinent dégagent de l'électricité positive. De là les noms de corps *electro-négatifs* donnés aux premiers, et de corps *electro-positifs* donnés aux seconds ¹.

L'affinité, d'après ce que nous venons de dire, en déterminant une réaction chimique, provoque donc un dégagement électrique. Mais il arrive aussi que, par réciproque, un courant électrique peut déterminer une affinité chimique. Quelle est la cause prédominante? C'est une question bien difficile à résoudre; toujours est-il que si la disposition électrique des corps, par la facilité qu'ils pourraient avoir d'abandonner plus facilement telle ou telle des deux électricités, leur donne une propension à s'unir suivant les lois des attractions électriques, la présence d'un courant obligé de traverser ces corps à l'état de combinaison, doit en opérer la séparation, en rendant forcément à chacun l'électricité abandonnée au moment de la combinaison.

D'après ce principe et surtout d'après la loi de Faraday, sur la transmission électrique par voie de décompositions chimiques, on pourrait croire que les liquides n'ont pas de conductibilité propre et indépendante de l'action électrolytique ². Mais ce principe qui avait été admis jusqu'ici à été dernièrement, d'après les expériences de MM. Foucault,

1. Voir le traité d'électricité de MM. Becquerel sur cette question.

2. Action décomposante.

Faraday, Matteucci, Masson et Despretz, reconnu faux, et on s'est convaincu que les liquides, en outre de leur conductibilité électrolytique ou décomposante, ont une conductibilité propre, très-faible à la vérité, mais qui se révèle surtout pour les courants de faible tension, assez peu énergiques pour opérer une décomposition. Ce principe, qui avait étonné beaucoup de physiciens dans l'origine, n'a d'ailleurs rien qui puisse surprendre, et ce qui serait le plus étonnant, selon moi, c'est qu'il n'existât pas. Du reste, l'expérience de M. Faraday par laquelle des courants d'induction ont pu être créés au sein d'un liquide, en introduisant celui-ci dans un long tuyau de caoutchouc, enroulé autour d'un cylindre de fer doux soumis à l'induction et l'expérience de Masson par laquelle le courant d'induction de la machine de Ruhmkorff a pu échauffer jusqu'à l'ébullition de l'alcool sans le décomposer, ont levé tous les doutes à cet égard. Ainsi la loi des équivalents électrochimiques de Faraday, toujours théoriquement vraie quant à la conductibilité électrolytique des liquides, ne l'est plus par rapport à leur conductibilité propre; mais, dans la pratique, cette loi peut toujours être regardée comme suffisamment rigoureuse, car, comme je l'ai déjà dit, cette conductibilité propre des liquides n'intervient que très-faiblement et pour faciliter la conductibilité électrolytique.

Bien que toutes réactions chimiques provoquent un dégagement électrique, il ne faudrait pas croire que ce dégagement pût être déterminé au même degré par ces différentes réactions; les unes le favorisent, les autres le combattent. D'ailleurs, la disposition des éléments appelés à réagir les uns sur les autres, ne permet pas toujours de recueillir les électricités dégagées. Dans les appareils destinés à produire de l'électricité par voie de réactions chimiques, on a donc dû se préoccuper de cette double question, et c'est ainsi que la *pile* s'est trouvée successivement perfectionnée.

Historique des divers perfectionnements de la pile. — Tout le monde connaît la pile de Volta ; mais ce qu'on ignore en général, c'est que cet illustre savant eut, dès l'origine de sa découverte, l'idée de la pile à deux liquides, qui est venue, dans ces derniers temps, réaliser d'une manière si inattendue le problème des courants constants.

Sir Humphry Davy, en poursuivant cette idée de Volta, construisit même plusieurs systèmes de piles à deux liquides ; mais il n'en obtint alors aucun résultat avantageux, principalement à cause de la difficulté que présentaient la séparation des liquides et leur mise en contact.

Les piles de Wollaston furent, comme je l'ai déjà dit, la première modification importante de la pile de Volta ; chaque élément se composait d'une lame de zinc enveloppée par une lame de cuivre dont elle était isolée par de petites cales de bois, et le tout plongeait dans une auge carrée remplie d'eau acidulée ; ces piles purent fournir une bien plus grande quantité d'électricité que celles de Volta, et furent généralement employées jusqu'à l'invention de la pile à deux liquides, malgré l'irrégularité de leur action et leur disposition encombrante.

En 1826, M. Becquerel, qui commençait alors ses magnifiques travaux sur l'électro-chimie, ayant reconnu que le défaut de constance dans le dégagement électrique produit par les piles provenait du dépôt de bulles de gaz sur les lames polaires, chercha un moyen d'empêcher cette action nuisible à laquelle fut donné le nom de *polarisation électrique*, en faisant en sorte que la pile elle-même provoquât une réaction chimique capable d'absorber les gaz dégagés.

Dans ce but, il construisit des couples dans lesquels deux liquides pouvant réagir l'un sur l'autre se trouvaient mis en contact à travers les pores d'une cloison poreuse. Les liquides étaient : d'un côté de l'acide nitrique, de l'autre

une solution de potasse. Deux lames de platine plongeant dans chaque compartiment, prenaient la polarité de ces liquides, et constituaient les pôles de la nouvelle pile : M. Becquerel obtint de cette pile l'effet qu'il en attendait, c'est-à-dire un dégagement électrique parfaitement constant.

Trois ans plus tard, en 1829, le même savant en partant toujours du même principe théorique, chercha une nouvelle combinaison des liquides de sa pile qui pût lui permettre d'employer l'oxydation si énergique du zinc tout en empêchant les effets de la polarisation électrique. Les liquides qu'il trouva être les plus favorables pour cette double action furent le *sulfate ou le nitrate de cuivre et une solution saline neutre*. Les résultats fournis par cette pile furent des plus satisfaisants, et M. Becquerel s'en est toujours servi depuis ce moment dans ses expériences. C'est cette pile que nous employons aujourd'hui sous le nom de pile de Daniell, bien que M. Daniell n'ait fait connaître celle qui porte son nom que sept ans plus tard.

S'il faut en croire M. Daniell, le principe sur lequel il se serait appuyé pour imaginer la pile à sulfate de cuivre, serait bien différent de celui qui avait guidé M. Becquerel. Suivant le physicien anglais, l'irrégularité du dégagement électrique dans les piles de Wollaston, proviendrait de la précipitation du zinc sur le cuivre, en sorte que le but qu'on devait se proposer dans les perfectionnements à apporter à cette pile, était de substituer à cette précipitation nuisible, une précipitation utile. Or, en faisant plonger le cuivre de la pile de Wollaston dans une dissolution de sulfate de cuivre mise en contact à travers une cloison poreuse avec l'eau acidulée, dans laquelle était immergé le zinc, cette précipitation utile s'opérait naturellement par le dépôt du cuivre du sulfate sur l'électrode de cuivre. Il est reconnu maintenant que l'effet produit tient à la dépolarisation de la lame négative, comme M. Becquerel l'avait annoncé.

Quelques années plus tard, en 1839, M. Grove, qui débutait alors dans la carrière scientifique, où il s'est depuis tant illustré, chercha à perfectionner la pile de Wollaston, en utilisant, au profit du dégagement électrique, toute la puissance d'oxydation dont le zinc était susceptible, et cela en empêchant la précipitation de l'élément négatif sur l'élément positif. Une expérience inattendue, et des plus curieuses en elle-même, le mit bientôt à même de réaliser ses espérances. Voici quelle fut cette expérience :

« Après avoir mastiqué au fond d'un petit verre la tête
« d'une pipe à fumer ordinaire, dit M. Grove, je versai dans
« celle-ci de l'acide nitrique pur et de l'acide chlorhydrique
« dans le verre. Deux feuilles d'or furent ensuite plongées
« dans ce dernier acide et abandonnées à elles-mêmes pen-
« dant plus d'une heure. Au bout de ce temps, ces feuilles
« étaient aussi brillantes qu'au moment d'être trempées.
« Alors un fil d'or fut placé de manière à ce qu'il touchât
« en même temps l'acide nitrique et l'extrémité d'une des
« feuilles d'or. La feuille touchée fut immédiatement dis-
« soute, tandis que l'autre ne fut pas attaquée, et le fil lui-
« même qui avait plongé dans l'acide nitrique n'avait subi
« aucune altération; enfin, un galvanomètre, interposé
« entre deux lames plongeant dans les deux acides, dénota
« immédiatement la présence d'un courant excessivement
« énergique, dans lequel la lame dissoute représentait l'élé-
« ment négatif et la lame inattaquée l'élément positif. »

Les conclusions que M. Grove déduisit de cette expérience furent :

1° Que de la réaction des deux acides l'un sur l'autre naissait un courant électrique qui, étant convenablement établi, pouvait opérer leur décomposition;

2° Que de cette décomposition résultait une combinaison d'hydrogène et d'oxygène ayant pour résultat de désoxyder l'acide nitrique, et de laisser libre le chlore de l'acide chlor-

hydrique, lequel chlore, en se portant sur la lame négative, en opérant la dissolution ;

3° Que l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, pouvant abandonner son hydrogène aussi facilement que l'acide chlorhydrique, pouvait être substituée à ce dernier acide dans l'expérience précédente, à la condition que la lame d'or négative fût remplacée par un métal facilement oxydable ;

4° Que le zinc étant le métal le plus électro-négatif qu'il y eût, son emploi comme élément négatif avec l'eau acidulée devait provoquer une réaction électrique beaucoup plus énergique ;

5° Que la lame d'or, plongée dans l'acide nitrique, ne devant pas être attaquée et prenant la polarité de cet acide, pouvait être remplacée avec avantage par un corps conducteur inattaquable aux acides, tel que le platine et le charbon ¹.

Ces conclusions furent le point de départ de la pile à acides que M. Grove ne tarda pas à perfectionner, en y introduisant les vases poreux en terre demi cuite ², qu'il substitua, avec infiniment d'avantages, aux diaphragmes d'argile ou aux membranes de baudruche que l'on avait employés jusqu'à cette époque dans les piles à deux liquides.

Il chercha ensuite à combiner, de diverses manières, les éléments de sa pile. Il avait, dans l'origine, placé les zincs dans les vases poreux, et le platine roulé en cylindre ³ dans le vase extérieur, où se trouvait l'acide nitrique ; mais il ne tarda pas à se convaincre que l'oxydation serait plus grande et par conséquent la quantité d'électricité dégagée plus considérable en renversant cette disposition,

1. Voir les comptes rendus de l'Académie des Sciences, année 1839.

2. Cette terre, qui est rouge et qui se trouve en Angleterre, constitue, paraît-il, de très-bons vases poreux.

et il plaça, depuis lors, les zincs en dehors des vases poreux et les lames de platine en dedans, en changeant, bien entendu, de place les acides.

Enfin, il chercha à substituer le charbon de bois et même de cornue¹ au platine, pour obtenir une pile moins chère; mais, pensant que, dans le monde scientifique, on n'apprécierait, comme étant véritablement en harmonie avec la science, que les électrodes en platine, il ne parla jamais, dans ses Mémoires, des électrodes de charbon. Quoi qu'il en soit, six mois après la découverte de M. Grove, c'est-à-dire vers la fin de 1839, on vendait, chez un opticien de Charring Cross, à Londres, des piles à acides avec charbon de cornue en guise d'électrode de platine, et ces piles n'étaient en aucun point différentes de ce qu'elles sont aujourd'hui. M. Cooper, en Angleterre, publia même, en ce temps-là, un long Mémoire (qui est inscrit dans les *Transactions philosophiques* de la Société royale de Londres) pour démontrer l'importance des piles à charbon.

Ce n'est qu'en 1843 que M. de Bunsen, chimiste à Heidelberg, ignorant sans doute les travaux de MM. Grove et Cooper, proposa, comme *amélioration économique* des piles à acides, le charbon en guise d'électrode positif, et comme il en était resté à la première disposition des piles de M. Grove, il s'efforça de composer un charbon susceptible d'être moulé en cylindre. C'est ainsi qu'ont été construites, jusqu'en 1849, toutes les piles à acides employées en France et en Allemagne. A cette époque, M. Archereau, habile expérimentateur, en changea la disposition, et, sans s'en douter, mit en vogue les piles de Grove, telles qu'elles avaient été combinées, dix ans auparavant, à Londres.

L'année même de la découverte de la pile à acides, c'est-à-dire en 1839, M. Grove envoya à l'Académie des Sciences

¹ Ce charbon est un résidu très-dur, que la houille laisse au fond des cornues dans lesquelles elle brûle dans les usines à gaz.

de Paris un Mémoire sur l'importance de l'emploi du zinc amalgamé dans les piles.

D'après ce mémoire, M. Grove attribue la perte d'action électrique des zincs non amalgamés à de petits courants secondaires créés au sein même du zinc par la présence simultanée dans ce métal de plusieurs métaux différents constituant des espèces de couples voltaïques. Or, l'amalgame, en faisant disparaître ces couples dans une espèce d'enveloppe homogène, devait favoriser l'action électrique, et c'est en effet ce que l'expérience a démontré.

Les Mémoires de M. Grove sur ces différentes questions sont insérés dans les comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris (année 1839), et sont excessivement curieux à étudier.

Malgré l'analogie apparente qui existe entre la première des piles de M. Becquerel et celle de M. Grove, il est facile de voir que le point de départ de ces deux piles était bien différent. En effet, dans la pile à acide nitrique et à solution de potasse que M. Becquerel présenta à l'Académie des Sciences, en 1826, les lames polaires plongeant dans les deux liquides étaient toutes les deux en platine et la constance du dégagement électrique était basée sur la dépolarisation continuelle des lames, par suite de l'action électro-chimique qui résultait de l'effet électrique produit au contact de l'acide et de l'alcali. Dans la pile de M. Grove, au contraire, c'est la précipitation du métal négatif sur l'élément positif qu'on a cherché à éviter, et la puissance d'oxydation du métal électro-négatif qu'on a eu en vue de surexciter par une double réaction chimique. C'est pour cela que cette dernière pile, quoique n'ayant pas la constance de celle de M. Becquerel, a pu fournir un dégagement électrique bien plus considérable. Si M. Becquerel avait substitué à la lame de platine plongeant dans la solution de potasse de sa pile une lame de zinc, il serait arrivé au même résultat que

M. Grove, et les piles à acides, qui sont si énergiques, auraient été découvertes treize ans plus tôt, car la solution de potasse joue exactement le même rôle (comme le constate M. Grove lui-même) que l'eau acidulée; mais comme le problème qu'avait en vue M. Becquerel ne le conduisait pas à cette substitution, cette petite différence de disposition entre les deux piles constitue une ligne de démarcation très-tranchée entre les deux systèmes.

Théorie de la pile. — Jusqu'à présent, nous avons étudié les différents perfectionnements apportés à la pile au point de vue théorique de leurs inventeurs; mais, à l'époque où se firent ces perfectionnements, les connaissances théoriques sur les causes productrices de l'électricité n'étaient pas aussi avancées qu'elles le sont aujourd'hui. Je vais donc exposer la théorie de ces piles telle qu'on la professe actuellement en France, sans toutefois invalider pour cela celle qu'en ont donnée MM. Becquerel, Grove et Daniell. Trop souvent, hélas ! les théories physiques ont dû être modifiées par suite de découvertes nouvelles pour être ensuite remises en honneur. Il peut donc se faire que ces physiciens, quoique ne donnant pas alors de leur pile une théorie complètement en rapport avec les idées actuelles, aient pourtant été dans le vrai.

Nous prendrons d'abord la pile la plus simple, celle de Smée ou de Wollaston, composée, comme on le sait, d'un couple zinc et platine ou zinc et cuivre, plongé dans l'eau acidulée. Qu'arrive-t-il au moment de l'immersion du couple ?

Le zinc, se trouvant en présence de l'eau acidulée, se trouve oxydé et par conséquent l'eau est décomposée. Il devrait donc y avoir un double dégagement d'électricité, puisque deux actions chimiques différentes se sont opérées en même temps. Mais remarquons que, dans ce cas, l'oxygène sort d'une combinaison pour entrer dans une autre. Son état électrique persiste donc, et il n'y a à considérer

que les électricités des éléments qui changent de condition, savoir : l'équivalent d'hydrogène qui se dégage et qui doit reprendre au liquide et, par suite, à la lame métallique immergée le fluide négatif qu'il avait perdu au moment de sa combinaison; enfin, l'équivalent de zinc, qui entre en combinaison, et qui doit, comme corps électro-négatif, dégager de l'électricité négative.

Il y a bien encore une réaction chimique qui doit donner lieu à un dégagement électrique, c'est la combinaison de l'oxyde de zinc avec l'acide sulfurique; mais elle est perdue, parce que les éléments producteurs se trouvent dissous ensemble.

Dans la pile Bunsen, le dégagement électrique est double, car à l'oxydation du zinc, qui se manifeste comme dans la pile précédente, se joint la désoxydation de l'acide azotique par l'hydrogène devenu libre qui, au lieu de se dégager, se porte sur l'oxygène de l'acide pour former de l'eau. Il en résulte que, comme dans le cas précédent, l'hydrogène sort d'une combinaison pour entrer dans une autre. Son état électrique reste par conséquent le même, mais l'acide azotique auquel il s'est allié et qui joue alors le rôle de corps électro-positif, dégage de l'électricité positive. Remarquons toutefois que les deux réactions chimiques étant simultanées, bien que l'oxydation du zinc soit la cause initiale, l'action électrique doit être infiniment plus vive dans cette dernière pile que dans la première, car l'oxydation du zinc se trouve considérablement facilitée et activée par la combinaison immédiate de l'hydrogène qui, au lieu de présenter une résistance à l'action décomposante, comme dans le cas de son dégagement, lui prête, au contraire, un secours efficace.

Une réaction analogue se manifeste dans la pile de Daniell : l'eau se trouvant décomposée par l'oxydation du zinc un dégagement électrique se manifeste, et quand le cou-

rant traverse le couple, le sulfate de cuivre se trouve décomposé; l'acide sulfurique se porte sur le zinc et concourt à produire le courant, tandis que l'hydrogène de l'eau décomposée réduit le cuivre du sulfate. Celui-ci devenu forcément libre est obligé de prendre au conducteur immergé, en s'y précipitant, l'électricité négative qu'il avait perdue au moment de sa combinaison, et, par cela même, ce conducteur se trouve chargé d'électricité positive.

Dans la théorie que nous venons de donner de la pile à deux liquides, nous avons constaté l'augmentation de puissance qui devait résulter de la double réaction chimique qui se manifeste, mais nous n'avons pas expliqué en quoi cette double réaction devait rendre les courants fournis par ces piles plus constants dans leur force que ceux provenant des piles à un liquide. C'est ce que nous allons examiner maintenant.

Dans toutes les piles nous avons admis que c'était à la décomposition de l'eau par suite de l'oxydation de la lame polaire électro-négative que devait être rapportée la cause initiale du dégagement électrique. Or, de cette décomposition résulte un dégagement d'hydrogène que nous avons supposé s'effectuer complètement. S'il en était ainsi, il est probable que les courants des piles à un liquide seraient tout aussi constants que les autres; mais il arrive qu'une partie des bulles de gaz vient se déposer sur la surface même des lames polaires, et il en résulte non-seulement un obstacle pour l'oxydation, puisque les parties du zinc, ainsi abritées par ces bulles, ne peuvent être en contact avec l'eau acidulée, mais encore une augmentation considérable de résistance pour le dégagement électrique, résistance qui, comme nous le verrons bientôt, diminue l'intensité et l'énergie du courant. On a cherché à amoindrir cet inconvénient dans la pile de Smée, en employant comme lame polaire positive du platine *platiné* ou du cuivre *platiné*, parce

que la poudre noire de platine permet aux bulles de gaz de se dégager plus facilement ; mais ce moyen, quoique rendant la pile plus constante, ne la met pas dans les conditions d'exercer son effet maximum. Dans les piles à deux liquides où l'hydrogène se trouve absorbé ou attiré en dehors de la surface oxydée, cet inconvénient n'existe plus et c'est pour cela que les courants qui en proviennent ont une si grande constance et une si grande régularité dans leur action, du moins tant que les liquides excitateurs conservent leurs propriétés. C'est précisément sous ce point de vue que M. Becquerel avait envisagé la question de la pile, lorsqu'il proposa en 1827 et 1829 ses piles à courants constants ¹.

D'après ce que nous avons dit précédemment, une pile peut être considérée comme une machine électrique produisant les deux électricités, à cette différence près, que c'est une réaction chimique qui est substituée à l'action du frottement, et que les deux corps conducteurs sur lesquels les électricités sont dégagées (l'eau acidulée et le zinc, dans les piles à un liquide), sont en contact d'une manière permanente. Si la cause initiale qui provoque le dégagement électrique n'était pas persistante, les deux électricités, ainsi en présence, se combineraient directement sans passer par le circuit ; mais comme la réaction chimique est continuée, le dégagement électrique se maintient, même quand les fluides ne trouvent pas une issue pour se recomposer en dehors de la pile. Seulement alors la réaction chimique est beaucoup moins énergique, car les fluides ainsi en présence tendent à exercer leur action en sens inverse de cette réaction chimique qui est la cause initiale de leur développement. C'est ce qui arrive quand le circuit de la pile n'est pas fermé. Quand au contraire les deux lames polaires sont

¹ Voir pour ces questions théoriques l'ouvrage de MM. Bécquerel, sur l'électricité et celui de M. De la Rive.

réunies par un conducteur métallique, la recombinaison des fluides séparés peut s'effectuer librement, et leur absorption successive, à mesure qu'ils se développent, surexcite la réaction chimique. Par suite le dégagement électrique devient plus intense et plus énergique.

On peut facilement se convaincre de cette différence d'action électrique avec la pile de Smée. Quand le circuit n'est pas fermé, on n'aperçoit aucun dégagement de gaz à travers le liquide, mais aussitôt que les deux éléments polaires sont réunis, l'action chimique se développe avec énergie. C'est la petite quantité d'électricité maintenue libre, quand les pôles de la pile ne sont pas réunis, et qui échappe à la recombinaison pendant le temps que s'effectue le dégagement électrique, qui constitue sa *tension*. La force elle-même, en vertu de laquelle les deux corps excitateurs en contact se constituent dans deux états électriques différents par les actions des affinités de la chaleur, etc., est ce que nous appellerons la *force électro-motrice*.

Formules des piles voltaïques (de Ohm). Supposons que dans un couple à courant constant, on désigne par E l'excès de tension des électricités résultant des quantités qui restent en présence quand le circuit est ouvert, c'est-à-dire la force électro-motrice du couple. Quand on ferme le circuit, la circulation de l'électricité aura lieu en raison de $+E$ et $-E$. Or, la quantité qui passera dans un temps donné dans le circuit et qui constitue l'intensité du courant dépendra de sa résistance à la conductibilité et sera en raison inverse de cette résistance. Si on désigne l'intensité du courant par I et la résistance du courant par R on aura :

$$[1] \quad I = \frac{E}{R}.$$

Si, au lieu d'un couple, on considère une pile formée

de n éléments, les effets seront les mêmes, la résistance totale sera nR , l'excès de tension électrique sera nE , et on

aura pour l'intensité du courant [2] $I = \frac{nE}{nR}$.

Telle est la formule fondamentale des piles voltaïques. On l'exprime en disant : « l'intensité d'un courant électrique dans une pile voltaïque est égale à la somme des forces électro-motrices développées dans chaque couple divisé par la somme des résistances de ces couples. » On doit entendre par somme des forces électro-motrices celle qui résulte de l'ensemble de toutes les réactions chimiques qui s'opèrent quand le circuit de la pile est fermé.

Si l'on joint les deux pôles d'une pile de n éléments par un fil ou un conducteur d'une résistance r , la résistance du circuit augmente et sera $nR + r$; alors on aura :

$$[3] I = \frac{nE}{nR + r}.$$

On déduit de ces formules plusieurs conséquences importantes :

1° Un couple est d'autant plus énergique que sa force électro-motrice est plus grande et que sa résistance est moindre. Ainsi, en cherchant les conditions dans lesquelles ces deux quantités peuvent être augmentées ou diminuées, on obtiendra des piles plus énergiques.

2° Un couple donne autant d'électricité qu'une pile d'un nombre n d'éléments, quand il n'y a pas de résistance additionnelle. En effet, les formules [1] et [2] donnent la même valeur pour I .

3° Si la résistance additionnelle r croît proportionnellement au nombre des éléments que l'on ajoute, alors l'intensité électrique reste la même, quel que soit le nombre de couples.

En effet, avec un couple on a $I = \frac{E}{R+r}$; avec n couples, la résistance étant nr , par hypothèse on aura, d'après la formule [3], $I = \frac{nE}{nR+nr}$, c'est-à-dire $I = \frac{E}{R+r}$.

4° L'étendue d'un couple augmente la *quantité d'électricité*, car dans la formule [1], quand le couple a une plus grande étendue, E est plus grand, et R la résistance est plus petit.

5° Le nombre des éléments de la pile augmente la *tension* et permet à l'électricité de franchir une plus grande résistance. On peut en effet, en divisant par n les deux termes de la fraction, mettre la formule [3], sous la forme

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}}. \text{ On voit alors que à mesure que } n \text{ croît}$$

$\frac{r}{n}$ diminue et l'intensité I augmente.

Ces conséquences, qui sont la clef de toutes les applications que l'on peut faire des courants électriques et que le calcul démontre d'une manière si simple, indiquent par elles-mêmes ce qu'il faut entendre par les mots *quantité* et *tension* des courants.

L'électricité sera en plus grande quantité dans un courant que dans un autre, quand, pour une *même résistance de circuit*, l'intensité électrique accusée par un rhéomètre sera plus grande dans un cas que dans l'autre. Or, pour obtenir cette augmentation d'intensité, nous avons vu qu'il fallait augmenter la surface du couple.

L'électricité aura une plus grande tension dans un courant que dans un autre, quand, pour une *même intensité* accusée par le rhéomètre, l'un des circuits présentera une

plus grande résistance que l'autre. Or, nous savons que pour obtenir cette augmentation de tension il suffit d'augmenter le nombre des éléments de la pile.

La tension d'un courant n'est donc en dernier résultat que la faculté qu'il peut avoir de traverser un long circuit sans diminuer trop rapidement d'intensité.

Une pile composée de plusieurs éléments peut être disposée de manière à fournir de l'électricité de *quantité* ou de l'électricité de *tension*. En effet, en réunissant ensemble tous les pôles semblables, on fait de cette pile un seul couple à grande surface, et par conséquent l'électricité qui en résulte est en quantité, surtout si le circuit est de grosse section et de bonne conductibilité. En réunissant au contraire les éléments par leurs pôles opposés, on les fait agir individuellement, et de leur plus ou moins grand nombre dépend la plus ou moins grande tension du courant.

Dans ses recherches sur les courants hydro-électriques, M. Pouillet a établi des formules particulières pour une pile disposée de ces deux manières. Ces formules sont :

$$\left. \frac{\Sigma r t}{\Sigma r - a(n-1) + l} \right\} \text{ pour les piles disposées en tension,}$$

$$\text{et } \left. \frac{r_1 r_2 \dots r_n (l_1 t_2 + \dots t_n)}{r_1 r_2 \dots r_n + a(r_2 r_3 \dots r_n + r_1 r_3 \dots r_n + \text{etc. } r_1 r_2 r_{(n-1)})} \right\} \text{ pour les}$$

piles disposées en quantité, r représentant la résistance individuelle de chaque élément, t son intensité; Σ la somme des quantités semblables $r_1 r_2 + \dots r_n$; n le nombre des éléments, a la longueur des conducteurs communs aux éléments, l la longueur du circuit.

La discussion de ces formules démontre conformément aux conclusions des lois de Ohm :

1° Que l'intensité d'une pile composée d'un certain nombre d'éléments réunis par leurs pôles contraires peut être réduite à celle d'un seul élément, si le circuit que le courant traverse offre une très-petite résistance.

2° Que cette intensité, au contraire, peut devenir pour la même pile proportionnelle au nombre de ses éléments, quand la résistance du circuit est considérable et que la résistance intérieure de chaque élément est très-faible.

3° Que dans une pile composée d'un certain nombre d'éléments réunis par leurs pôles semblables, l'intensité du courant peut devenir proportionnelle au nombre des éléments, quand la résistance du circuit est infiniment faible.

4° Que cette intensité peut être réduite à celle d'un seul élément, quand la résistance du circuit est très-considérable.

5° Plusieurs savants, entre autres MM. Fechner, Wheatstone, J. Regnault, Becquerel, ont cherché à poser des formules pour la détermination de la force électro-motrice, de la résistance des liquides dans les couples et de la résistance au passage dans les conducteurs de différente nature; mais les éléments mis en jeu dans ces actions sont tellement variables que ces formules ne peuvent guère fournir de renseignements généraux. Je renverrai d'ailleurs le lecteur, pour ces sortes de questions, au *Traité d'électricité* de MM. Becquerel, 1^{er} vol., pages 243 et suivantes, et au *Traité de télégraphie* de M. l'abbé Moigno, pages 215 et suivantes.

Pour terminer avec les considérations générales sur les piles, je ne dois pas oublier de mentionner qu'il résulte de l'ensemble des effets observés, que l'on recueille toute l'électricité que produit un poids donné de zinc amalgamé; seulement la disposition des appareils et la résistance des circuits font que cette quantité d'électricité est usée plus ou moins vite dans un temps donné. On comprend d'après cela qu'on peut employer l'usure du zinc comme moyen de mesurer la quantité d'électricité dépensée par une pile dans une action quelconque à laquelle on l'utilise.

Il est encore un fait assez important à constater, bien

qu'il soit la conséquence naturelle de la manière même dont le dégagement électrique est provoqué, c'est qu'une pile de forme quelconque dégage l'électricité en d'autant plus grande quantité que sa température est plus élevée. Cela est tellement vrai que les jours de gelée, les piles de Daniell, qui sont pourtant les plus constantes de toutes, sont pour ainsi dire paralysées. Cet effet provient, comme on le comprend aisément, de ce que la réaction chimique est beaucoup moins énergique par un temps froid que par un temps chaud.

DISPOSITIONS DIVERSES DE LA PILE. — SA MANIPULATION.
— SON MONTAGE. — QUESTION ÉCONOMIQUE.

Piles de Grove, de Bunsen et d'Archereau. — Dans l'histoire que nous avons fait précédemment des divers perfectionnements de la pile, nous avons vu comment la pile de Wollaston était devenue successivement la pile de Daniell, la pile de Grove et la pile de Bunsen. Nous avons vu ensuite comment M. Archereau, en renversant la disposition de la pile de Bunsen pour obtenir une plus grande surface d'oxydation, et en substituant le charbon de cornue au charbon préparé, avait, sans s'en douter, remis en honneur les piles de M. Grove. Il nous reste maintenant à étudier la manière la plus avantageuse de construire ces piles.

Dans les piles qu'a fabriquées M. Archereau, et qui sont le plus généralement employées, le charbon n'est nullement travaillé : c'est une espèce de parallépipède qu'on a scié dans un morceau de charbon de cornue, et qui est uni à la lame métallique servant d'appendice polaire par une ligature en fils de cuivre, recouverte de soudure d'étain. Pour empêcher le plus possible l'oxydation de cette liaison métallique, la partie du charbon qui la porte est trempée dans un bain de cire à bouteille. Les zincs con-

istent simplement dans des morceaux rectangulaires de zinc en planche qu'on a roulés sur un gabarit et sur lesquels on a fixé la lame polaire qui doit être en cuivre rouge. Pour fixer ainsi cette lame, il est important de ne pas la souder, car elle ne tiendrait pas; il faut qu'elle soit fixée sur le métal par un rivet de fer ou de cuivre, encore est-il nécessaire que cette opération se fasse avant que le zinc soit amalgamé, car une fois combiné au mercure, ce métal devient si cassant que les coups de marteau pourraient le mettre en morceaux, surtout si le zinc est mince. Du reste, il faut bien se garder d'employer du zinc mince, car l'économie qu'on pourrait faire sur la matière serait bien vite dépassée par le prix de la main-d'œuvre et par son usure plus prompte; c'est ordinairement du zinc de 3 à 4 millimètres d'épaisseur qui est le plus convenable pour ce genre d'emploi.

Les vases dans lesquels se trouve versée l'eau acidulée doivent être choisis de préférence en grès, car le verre est trop fragile et la faïence se trouve bientôt fendue par l'action prolongée de l'acide, et surtout par les cristaux de sulfate de zinc qui la pénètrent. Enfin les vases poreux doivent être suffisamment grands pour dépasser d'environ 2 centimètres le vase extérieur et le cylindre de zinc¹.

Des piles construites de cette manière sont peu dispendieuses et peuvent durer longtemps, surtout si les zincs sont épais et bien amalgamés. Il faut, par exemple, avoir soin de retirer de leurs acides les zincs et les charbons aussitôt que la pile ne fonctionne plus, et de placer ces derniers *débout*, afin que l'acide azotique ne glisse pas sur le charbon et ne vienne pas attaquer directement la ligature. Malgré ces précautions, il arrive qu'au bout d'un certain temps il se forme, par l'endosmose de l'acide, un

1. Chez M. Duponchel, rue de Rivoli, on trouve un grand assortiment de ces différents vases à des prix modérés.

nitrate d'étain et de cuivre qui soulève la cire à bouteille, et finit par tellement s'interposer entre le charbon et la lame polaire que la transmission électrique n'est plus possible. Il faut alors refaire une autre ligature, ou employer quelques-uns des moyens de liaison dont nous allons parler dans quelques instants. Quant au zinc, on a bien trouvé un moyen de l'amalgame sans cesse, en versant dans l'eau acidulée du nitrate de bioxyde de mercure; mais, malgré son amalgame, ce métal finit par s'user assez promptement.

Pour amalgamer les zincs, on les place ordinairement dans une espèce de petit moule en bois, ayant à peu près la forme du zinc; on verse du mercure dans ce moule et on plonge le tout dans une cuve remplie d'eau acidulée. Alors, avec un pinceau composé de fils de cuivre très-fins, on promène le mercure sur toute la surface du zinc, qui se l'approprie d'autant mieux que l'amalgamation s'opère en même temps que le décapage.

Quelle que simple que paraisse cette méthode, elle exige encore un temps tellement long que souvent on préfère user ses zincs plutôt que de recommencer à les amalgamer après qu'on s'en est servi. Pourtant cette opération est non-seulement importante au point de vue économique des zincs, mais encore au point de vue du dégagement électrique produit; on a donc cherché le moyen d'obtenir cette amalgamation instantanément par la simple immersion des zincs dans un liquide. Un savant anglais, dont on m'a laissé ignorer le nom, a résolu complètement ce problème, en mêlant le nitrate de bioxyde de mercure à l'acide chlorhydrique. Avec un liquide ainsi préparé, il suffit d'une seconde d'immersion pour amalgamer complètement le zinc le plus rongé et le plus sale. Le prix de ce liquide est d'ailleurs beaucoup moins élevé que celui du nitrate de mercure. M. Berjot à Caen le vend 2 fr. le litre, et, avec

un litre, on peut amalgamer plus de 150 zincs, encore peut-on le révivifier quand il est par trop affaibli.

Les piles de Grove, disposées ainsi que nous venons de le dire, ont une force généralement supérieure à celle de deux éléments de Bunsen, de mêmes dimensions, réunis, soit en tension, soit en surface. Inutile, par conséquent, de dire qu'elles ont été immédiatement adoptées partout.

Quand une invention a fait sensation dans le public, il se trouve toujours des personnes qui perfectionnent ou qui croient perfectionner. Pour la pile en question, le nombre en est incommensurable. Tantôt c'est M. Deleuil qui reprend en sous-œuvre le charbon préparé pour l'introduire dans la pile d'Archereau, en pratiquant à sa partie supérieure un trou propre à recevoir un bouchon métallique soudé à l'extrémité du pôle négatif de l'élément suivant; tantôt c'est le charbon de cornue, de la pile d'Archereau, qui, au lieu d'être ligaturé avec la lame de cuivre, est fendu de manière à ce que cette lame de cuivre s'y trouve introduite de force; tantôt c'est une pince de cuivre, avec vis de pression, qui sert d'attache aux lames polaires. Tous ces perfectionnements n'ont été faits qu'en vue d'empêcher l'oxydation des lames polaires et de diminuer, par conséquent, la résistance opposée à la transmission du fluide. Mais y est-on bien parvenu par ces différents moyens? le bouchon métallique, la lame introduite dans la fente du charbon, la pince qui saisit le charbon comme dans un étau, sont-elles moins sujettes à s'oxyder que la simple ligature d'Archereau?... On peut, dira-t-on, les nettoyer... Sans doute; mais y pensera-t-on ou voudra-t-on prendre ce soin? Pour qui connaît les expérimentateurs de physique, la réponse à cette question ne sera pas douteuse... A côté de ces prétendus perfectionnements, je vais aussi hasarder le mien; car, en ma qualité de physicien et, par conséquent, d'homme sujet aux illusions, je ne dois pas me séparer de mes confrères, surtout quand

je les attaque dans une infirmité que je partage. Donc, voici le perfectionnement que j'ai apporté à ce système de montage de pile. (Voir les fig. 2, 3, 4, 5, 6, pl. I.)

Je pratique, à la partie supérieure du charbon, un trou d'environ 4 centimètres de profondeur. J'introduis dans ce trou quelques gouttes de mercure, et je le bouche avec un bouchon métallique adapté, comme dans le système de Deleuil, au pôle négatif de l'élément suivant. Seulement, j'ajoute à ce bouchon un petit fil de fer assez long pour plonger dans le mercure. On conçoit que, par l'effet de sa mobilité extrême, le mercure est toujours en contact parfait avec le charbon. Or, comme le mercure est lui-même en contact assuré avec le bouchon, par l'intermédiaire du fil de fer, l'oxydation n'est jamais à craindre. Si elle se fait par suite de l'endosmose de l'acide azotique, le nitrate de bioxyde de mercure qui se forme alors, se superpose sur le mercure et peut être employé pour servir à l'amalgame des zincs. C'est ce système que j'ai adopté pour mes piles permanentes, dont j'aurai à l'instant occasion de parler.

Manipulation des piles Bunsen. — La charge des piles Bunsen est longue, ennuyeuse, et donne toujours lieu à des émanations nitreuses, qui sont malsaines : leur manipulation facile et prompte est donc un des problèmes les plus importants de la science électrique. Depuis longtemps, cette question a préoccupé les physiciens, mais ce n'est que dernièrement qu'elle a reçu une entière solution.

Ce problème peut être résolu de deux manières : soit par un procédé mécanique à l'aide duquel on peut charger ou décharger en peu d'instants de leurs acides les divers éléments de la pile (tout prêts montés) ; soit par un procédé au moyen duquel la pile puisse être maintenue toujours en état de fonctionner instantanément au gré de l'expérimentateur, sans qu'il y ait pour cela altération des éléments producteurs de l'électricité quand la pile est inactive.

Le premier de ces systèmes, imaginé par M. Archereau, convient à de fortes batteries ; le second, imaginé par moi, ne peut guère s'approprier qu'à des batteries de huit ou dix éléments au plus.

Système d'Archereau. — Le système d'Archereau consiste à employer deux pompes qui injectent, dans les compartiments des piles où ils doivent être versés, les liquides excitants, et cela au moyen de tubes verticaux plongeant jusqu'au fond des vases. Ces tubes en gutta-percha, au nombre de deux pour chaque élément de pile, sont soudés à deux conduits horizontaux qui se trouvent reliés aux pompes et qui sont d'un diamètre assez grand pour que les liquides injectés puissent être distribués à la fois dans tous les tubes verticaux. Les pompes employées par M. Archereau sont construites de manière à ce que le tube aspirateur devient, au gré de l'expérimentateur, tube injecteur *et vice versa*. Il en résulte que, sans déranger les conduits, on chasse le liquide d'un réservoir dans la pile, ou on le fait revenir de la pile dans le réservoir.

La pompe a pour effet, il est vrai, de lancer une quantité de liquide moindre dans les vases les plus éloignés que dans les vases les plus rapprochés ; mais comme les systèmes de tubes verticaux et horizontaux se trouvent remplis d'un seul coup par les pompes, il s'établit, par l'action syphoïdique de tout le système de conduits un niveau parfaitement égal dans tous les vases de la pile, pendant les injections intermittentes de la pompe ou plutôt pendant que la pompe agit pour aspirer le liquide du réservoir. On peut vider la pile par le seul effet des conduits formant le siphon composé. Le liquide revient au réservoir de lui-même, si l'on ne ferme pas le tube principal. Le système syphoïdique étant une fois amorcé, il y aurait à craindre qu'il ne s'établisse par les liquides une communication électrique qui empêcherait le fonctionnement de la pile ; mais il est facile de

prévenir cet inconvénient en vidant les tuyaux, ce que l'on peut faire en soulevant simplement hors des liquides un des tubes plongeurs.

Une pile de 100 éléments, dit M. Archereau, peut, avec ce système, être chargée en cinq minutes. Il suffit d'un coup ou de deux coups de pompe pour réamorcer le système syphoïdique, et tout se vide ensuite sans aucune manipulation.

Ce système, comme on le voit, est excessivement simple, et peut s'appliquer tout aussi bien aux piles à un seul liquide qu'aux piles à deux liquides.

Dans le cas où l'on ne voudrait pas employer de pompes, M. Archereau a proposé un autre système excessivement ingénieux, par lequel les liquides se déversent d'eux-mêmes dans les différents vases où ils doivent être distribués.

Voici en quoi il consiste :

La batterie toute montée, comme dans le système précédent, est placée dans une grande caisse recouverte d'un enduit imperméable et inattaquable à l'eau acidulée. Cette caisse est placée au-dessous des deux réservoirs dans lesquels se trouvent en provision les liquides excitateurs, et peut, d'autre part, communiquer avec un troisième réservoir.

Les vases extérieurs des piles en grès bien vernissé sont tous percés à leur partie inférieure d'un petit trou à travers lequel passe un bouchon de caoutchouc. Ces bouchons, suffisamment retenus à l'extérieur des vases, sont fortement attachés à des ficelles, et ces ficelles sont toutes fixées à des traverses de bois appuyées sur les bords de la caisse. Avec cette disposition, l'eau acidulée qui remplira la caisse ne pourra pénétrer dans les vases qu'autant que les bouchons de caoutchouc auront été soulevés par un moyen quelconque ; il ne s'établira donc à l'état normal aucune communication liquide entre les différents éléments de la batterie. Pour soulever les bouchons, il suffit simplement de

tirer les traverses de bas en haut, car le caoutchouc, en s'allongeant, s'amincit et laisse par cela même un facile accès au liquide.

Tous les vases extérieurs se trouvent donc remplis de cette manière presque instantanément. Pour l'acide azotique, l'opération est plus délicate en ce qu'elle exige une combinaison de siphons sans cesse amorcés et susceptibles d'offrir à un moment donné un isolement complet des liquides contenus dans chacun des vases poreux de la pile. Pour obtenir cet amorcement permanent, M. Archereau vernit la partie inférieure des vases poreux, de manière à ce qu'il reste toujours au fond de ces vases une assez grande quantité d'acide azotique pour que l'air n'entre pas dans les siphons. Ceux-ci, qui communiquent d'un vase poreux à l'autre, peuvent être en verre ou mieux en gutta-percha rendue inattaquable à l'action de l'acide azotique. Ces siphons présentent en leur point de courbure un petit robinet en matière non conductrice de l'électricité qui peut, étant fermé, intercepter la communication des liquides dans les deux branches des siphons. Le jeu de l'appareil est alors facile à concevoir. Au moment où l'on veut charger la pile, on ouvre le robinet du réservoir d'acide azotique, et ce liquide, par l'intermédiaire d'un conduit, s'écoule dans le premier vase poreux; mais, comme le siphon qui réunit ce vase au suivant est amorcé, le liquide s'écoule dans ce dernier, puis de la même manière dans le troisième, le quatrième, etc., jusqu'au dernier. Il faut, par exemple, comme on le comprend aisément, que la grosseur des tuyaux soit calculée de manière à ce que le niveau du liquide dans les différents vases s'établisse le plus régulièrement possible.

Quand les différents vases poreux se trouvent remplis, on ferme les robinets pour empêcher la communication des liquides, et la pile est en état de fonctionner.

Pour la décharger, il suffit d'un siphon que l'on tient toujours amorcé, et par l'intermédiaire duquel on réunit le dernier vase poreux de la batterie au réservoir de décharge. On ouvre les robinets des siphons, et les vases se vident absolument de la même manière qu'ils s'étaient remplis.

Pour les vases extérieurs où se trouve déversée l'eau acidulée, ils se vident, comme on l'a déjà deviné, en faisant écouler l'eau acidulée de la caisse et en tirant de nouveau les tringles de bois, afin d'ouvrir les orifices de communication.

M. Jaxton, dans un brevet qu'il a pris pour un régulateur de lumière électrique, décrit un système de pile à peu près de ce genre; néanmoins, le système que nous venons d'étudier me paraît préférable, et, dans cette conviction, je me borne simplement à mentionner celui du physicien américain.

Système de M. Th. Du Moncel. — Étudions maintenant le second mode de montage des piles par lequel celles-ci sont toujours maintenues chargées, sans qu'il y ait pour cela altération des éléments producteurs de l'électricité quand la pile ne fonctionne pas. On comprendra facilement l'importance de cette question pour peu que l'on réfléchisse que quelquefois les expériences de physique bien faites durent plusieurs semaines, que souvent elles n'exigent de la pile qu'une activité très-passagère et de peu de durée, et que l'ennui de monter et de démonter une pile a été, pour les expérimentateurs, une cause qui les a souvent empêchés de faire des recherches qui auraient pu les conduire à un résultat important. Voici comment j'ai résolu le problème pour une petite pile de huit éléments, destinée à faire marcher (pour la curiosité des visiteurs) les différentes machines électro-magnétiques placées dans mon cabinet de physique. (Voir les fig. 7 et 8, pl. I.)

Dans mon système, rien n'est changé à la disposition de l'élément Bunsen. C'est toujours la disposition Archereau avec le zinc au dehors, seulement trois combinaisons mécaniques doivent y être adaptées : 1^o une combinaison pour le transport simultané de tous les vases poreux avec leur charbon ; 2^o une combinaison de récipients ou de réservoirs d'acide nitrique dans lesquels doivent plonger tous les vases poreux après qu'ils ont été enlevés ; 3^o une combinaison pour le transport des zincs.

1^{re} *Combinaison.* — La première combinaison consiste dans une simple planche de bois résineux percée de larges trous dans lesquels s'emboîtent exactement les vases poreux par leur partie supérieure. Ces trous sont faits, bien entendu, de manière à correspondre aux vases poreux suivant la position qu'ils occupent dans la pile. De plus, la planche est entièrement recouverte, ainsi que les rebords des trous, d'une couche épaisse de cire à bouteille ou de gutta-percha. Cette dernière substance doit être choisie de préférence pour être interposée dans les trous entre les vases poreux et le bois, car les émanations et les infiltrations de l'acide nitrique détruisent le bois avec la plus grande facilité. Les charbons restent dans leurs vases poreux respectifs et sont maintenus dans une position fixe par de petites cales de bois sur lesquelles on coule de la cire à bouteille. Il en résulte que les émanations si désagréables de l'acide nitreux se trouvent confinées à l'intérieur du vase et ne viennent pas empoisonner les expérimentateurs, pas plus pendant le travail de la pile que pendant son repos. Les appendices métalliques servant de pôles positifs sont fixés sur la planche par des vis, et communiquent aux charbons par le système de bouchon métallique trempant dans le mercure que j'ai décrit précédemment.

Par cette disposition tous les vases poreux de la batterie, ainsi que leurs charbons, peuvent être enlevés simultanément.

ment et transportés en dehors de la batterie; mais pour opérer ce transport sans démonter la pile, une condition indispensable restait à remplir; c'était de rendre les attaches des pôles positifs aux pôles négatifs susceptibles de se prêter à ce transport. C'est ce à quoi je suis parvenu en unissant les appendices métalliques servant de pôles aux divers éléments, par un, deux ou trois fils recouverts de gutta-percha, d'une longueur suffisante pour que le transport des vases puisse s'effectuer. Ainsi, avec cette combinaison, un seul mouvement accompli de la pile aux récipients permet de mettre la pile en état de fonctionner ou de ne pas fonctionner.

2^e *Combinaison*. — Si je m'étais contenté de transporter seulement les vases poreux avec leur acide et leur charbon en dehors de la pile, l'acide azotique en filtrant à travers les pores du vase poreux se serait bien vite perdu et évaporé. Il était donc nécessaire qu'au sortir de la pile les vases poreux plongeassent dans des récipients remplis eux-mêmes d'acide nitrique. De cette manière, l'acide nitrique des vases poreux au lieu de s'affaiblir par son contact avec l'eau acidulée, comme cela aurait lieu si on les laissait dans les vases extérieurs, ne fait que réparer ses pertes par son endosmose avec l'acide plus concentré des récipients. Un petit trou pratiqué dans le vase poreux, un peu au-dessous de la planche-support, permet d'ailleurs qu'un niveau constant s'établisse toujours dans les vases poreux après qu'ils ont été plongés dans leurs récipients respectifs.

Ces récipients consistent dans de petits bocaux de verre, un peu plus grands que les vases poreux eux-mêmes, et sont maintenus dans une position fixe pour être toujours à portée de ces derniers.

Afin d'éviter une évaporation trop grande de l'acide de ces récipients, chacun des vases poreux se trouve encadré au-dessous de la planche-support par une rondelle de

caoutchouc qui assure une fermeture plus exacte entre les bords supérieurs des récipients et la planche-support elle-même.

3^e *Combinaison*. — Pour faire sortir les zincs des vases à l'eau acidulée, la disposition que nous avons indiquée pour les vases poreux peut être employée ; seulement elle est dans ce cas beaucoup plus simple, puisqu'il suffit d'un cadre en bois qui circonscrive extérieurement ces zincs. Ceux-ci s'y trouvent fixés par leur appendice polaire à l'aide d'une vis, afin qu'on puisse aisément les remplacer quand ils sont usés ; de plus, ils ont leur amalgame entretenu par du nitrate de bioxyde de mercure.

En résumé, on voit que deux mouvements suffisent pour faire marcher ou arrêter la pile, et, au besoin, ces mouvements pourraient être combinés mécaniquement pour obtenir ce résultat d'un appartement à un autre où serait la pile.

Pour plus de sûreté et de commodité, la pile et les récipients doivent être placés dans une même caisse à bords très-bas.

Système de M. Fabre de Lagrange. — Les piles de Bunsen sont réputées constantes, parce qu'elles sont à deux liquides ; mais dans la pratique il est loin d'en être ainsi ; leur action diminue très-promptement, et cela tient en grande partie au sulfate de zinc qui se forme successivement et qui altère à tel point l'eau acidulée que celle-ci n'a plus de force oxydante. D'un autre côté, l'acide azotique s'affaiblit assez rapidement, d'abord par sa désoxygénation qui est la conséquence de l'effet électrique, mais surtout par son endosmose avec l'eau acidulée. Pourtant, cette dernière cause d'affaiblissement est bien minime, comparativement à la première. Ainsi, j'ai vu des piles, avec de l'acide azotique complètement usé et ayant servi pendant plusieurs mois, reprendre une énergie toute nouvelle avec de l'eau acidulée, nouvellement préparée.

M. Fabre de Lagrange, par une disposition mécanique particulière, a cherché à rendre constante l'action de ces piles aussi bien que celle des couples de Volta. « Cette continuité d'action, dit M. Fabre de Lagrange, s'obtient comme on obtient la continuité de l'action calorifique d'un fourneau garni en bas d'une grille pour laisser tomber les cendres, et qu'on alimente continuellement de combustible par le haut. Ce moyen est simple, et loin d'augmenter la dépense, il la diminue. On va en juger.

« Envisageons d'abord la disposition d'un seul couple à un seul liquide. Soit un vase percé d'un trou au milieu du fond, comme un pot à fleurs; dans ce vase, un diaphragme cylindrique en toile à voiles un peu moins élevé ayant le même axe et fixé, par la partie inférieure, au moyen d'un mastic. Dans le diaphragme est un crayon de charbon de cornue très-dense, entouré de petits grains de ce même charbon, et autour du diaphragme un cylindre de zinc amalgamé et de l'eau acidulée qui a été fournie goutte à goutte par un réservoir supérieur. Joignons maintenant les deux pôles par un fil conducteur et voyons ce qui se passe dans l'intérieur de l'appareil. L'eau acidulée, qui continue d'arriver goutte à goutte, se déversera, d'une part, par dessus le bord du diaphragme de toile sur les charbons qui seront ainsi continuellement lavés par le mouvement du liquide, sans être inondés, en sorte que la polarisation sera suspendue et que les bulles d'hydrogène se dégageront librement par les interstices des grains; d'autre part, les couches inférieures d'eau acidulée, par l'effet de la pression qu'elles supportent, filtreront lentement à travers la toile, ce que ne feront pas notablement les couches supérieures et moyennes. Or, ces couches inférieures sont précisément celles qui contiennent le sulfate de zinc qu'il s'agit d'éliminer. Le résultat est un courant électrique tout à fait constant jusqu'à l'entière disparition du zinc,

obtenu sans autre soin que celui d'alimenter le réservoir.

Voici maintenant comment on réunit un grand nombre de couples. Les vases de grès qui les contiennent, et qui peuvent être plus ou moins grands, sont réunis et cimentés en faisceau, en bloc facilement transportable; la surface supérieure de ce bloc est horizontale et de petites rigoles amènent l'eau acidulée à chaque capsule. Avec cette disposition, en plaçant au-dessus de la pile un second réservoir et en changeant la nature et l'élévation des diaphragmes, il est facile d'employer un second liquide que l'on fait tomber directement et goutte à goutte sur les charbons, soit, par exemple, de l'acide azotique; on l'emploie avantageusement affaibli et lorsqu'il ne peut plus servir pour les piles Bunsen ordinaires, parce qu'il n'absorbe plus l'hydrogène. Les liquides, à leur sortie des capsules, sont recueillis et peuvent réserver jusqu'à saturation. »

Système de MM. Jedlick et Csapo. — De tous les perfectionnements qui ont été introduits depuis quelques années dans la disposition des piles de Bunsen, aucun n'a fourni de résultats plus satisfaisants que celui qui a été réalisé dans la pile monstre exposée en 1855 par MM. Jedlick et Csapo, et qui a été pour leurs auteurs l'objet d'une récompense de deuxième classe.

L'élément Bunsen, dans ce système, rappelle par sa disposition celui de Wollaston. Le charbon qui est préparé à peu près comme celui des piles de Bunsen primitives est taillé en planche mince et carrée et se trouve introduit, comme on le voit (fig. 9, pl. 1), sur les deux côtés d'un cadre isolant et inattaquable aux acides. Pour éviter les effets de l'oxydation de la lame polaire positive qui s'y trouve adaptée, la partie supérieure de ce charbon a été trempée préalablement dans un bain de stéarine. De cette manière les pores du charbon se trouvent bouchés, et l'endosmose de l'acide est arrêtée. La partie supérieure de

cette portion du charbon ainsi enduite est ensuite poncée et plongée dans un bain de sulfate de cuivre, afin qu'elle puisse se recouvrir par la galvanisation d'un dépôt métallique. C'est sur ce dépôt qu'est soudée à l'étalu la lame polaire.

Le cadre isolant sur lequel est fixée la lame de charbon est confectionné avec un mélange fondu de peroxyde de fer, de soufre et d'amiante. Cette composition, qui peut se mouler très-facilement, devient après le refroidissement d'une extrême dureté et ne peut être attaquée par aucun acide.

En haut et en bas de ce cadre se trouvent adaptés deux petits tuyaux *a* et *b*, l'un (*a*) qui est en verre et qui est destiné à donner issue aux vapeurs nitreuses qui se dégagent, et l'autre *b* terminé par une petite boule, par lequel est introduit l'acide nitrique quand l'élément est monté. Ce dernier tuyau est composé avec les mêmes matières que le cadre.

Le vase poreux est constitué par du papier trempé dans de l'acide nitrique concentré que l'on colle au *collodion* sur toutes les faces du cadre. Grâce à sa préparation, qui lui a donné les propriétés du coton-poudre, ce papier peut résister aux acides, et comme il ne présente pas d'épaisseur, il n'oppose presque pas de résistance à la transmission du courant électrique.

C'est dans cette petite caisse de papier ainsi disposée qu'est contenu l'acide nitrique, et, pour achever le couple, il ne s'agit plus que de la placer dans une auge remplie d'eau acidulée, entre deux plaques de zinc de même grandeur qu'elle (fig. 10).

La disposition de ce couple permet de rapprocher très-près l'un de l'autre les éléments polaires, et par conséquent d'augmenter considérablement l'intensité du courant. Aussi un couple de cette nature équivaut-il (surface pour surface) à plus de deux éléments de Bunsen. De plus, en

raison de leur peu d'épaisseur, ces couples peuvent être réunis en grand nombre sur un petit espace, et, au moyen de la disposition indiquée (fig. 11, pl. I), ils peuvent être chargés et déchargés instantanément.

La pile représentée (fig. 11) est composée de neuf couples placés dans une même caisse et séparés les uns des autres par des cloisons en ardoise. La caisse elle-même a ses côtés intérieurs revêtus d'une enveloppe de caoutchouc, mais son fond est constitué par un plancher de mastic composé de la même matière que les cadres des éléments. Ce plancher de mastic est moulé de manière à présenter au milieu de chaque compartiment une concavité en forme de tasse dans laquelle s'emboîte exactement le bouchon semi-sphérique *b* (fig. 9) de l'élément positif. Ces concavités donnent ouverture à un petit trou qui correspond précisément à celui du bouchon *b*, mais qui aboutit intérieurement à un tuyau AB (fig. 11) ménagé à l'intérieur du plancher de mastic. Ces concavités se trouvent toutes placées du même côté, mais du côté opposé existent d'autres petits orifices disposés de la même manière qui communiquent à un second tuyau ménagé également dans le plancher de mastic. Ces deux tuyaux correspondent d'un côté de la pile à un tuyau vertical BD;AD' dans lequel on verse les liquides excitateurs au moyen d'un entonnoir C, et de l'autre à un robinet A par lequel ces liquides peuvent être écoulés. Inutile de dire que ce robinet A et les tuyaux DB,AD' sont composés avec le même mastic que le plancher. Enfin les éléments communiquent supérieurement au moyen des petits tubes *a* (fig. 9) à un conduit EG qui rejette au dehors les émanations nitreuses de la pile.

1. Ce mode de liaison des éléments positifs avec le tuyau A B est motivé par la nécessité dans laquelle on est de rendre l'élément positif mobile, et de l'assujettir, en le plaçant, à certains mouvements qui pourraient briser tout autre mode de communication. Du reste ce système a toujours parfaitement réussi.

Les liaisons métalliques des éléments entre eux se font par des lames attachées aux éléments polaires, et qui plongent dans deux rainures pratiquées sur le couvercle de la pile. Ces rainures, divisées en autant de compartiments qu'il y a d'éléments, sont remplies d'un amalgame de zinc, de sorte qu'à l'aide de lames métalliques recourbées on peut, avec la plus grande facilité, disposer la pile soit en tension, soit en quantité.

Pour charger la pile, il suffit de verser par les tuyaux verticaux BD AD' les acides jusqu'à ce que le niveau des liquides soit arrivé en D . On est sûr alors que les liquides sont arrivés à pareille hauteur dans les éléments, car ils forment tous avec ces tuyaux des vases communicants.

On a objecté que la communication des éléments entre eux par les liquides excitateurs devait affaiblir beaucoup la tension des piles ainsi disposées, mais il n'en est pas ainsi à cause de la facile pénétration des diaphragmes par les courants et de la petitesse des orifices de communication. Du reste l'expérience a démontré que cet inconvénient n'existait pas.

Dans la figure 11, un seul des tuyaux de charge est indiqué, c'est celui qui conduit l'acide nitrique dans les caisses positives. L'autre tuyau est placé du côté opposé de la figure, et l'on voit en D' l'extrémité du tube vertical qui lui correspond. C'est ce dernier tuyau qui distribue l'eau acidulée dans les compartiments séparés par les cloisons d'ardoises.

MM. Jedlick et Csapo ont essayé avec succès de substituer dans leur pile l'azotate de soude à l'acide nitrique. Ils ont constaté à la vérité un léger affaiblissement dans l'intensité du courant résultant, mais cet inconvénient était largement compensé par la constance plus grande du dégagement électrique.

Il paraîtrait, d'après les renseignements qui m'ont été

transmis, que la pile de MM. Jedlick et Csapo a été imaginée depuis longtemps, et que, depuis plus de dix ans, les inventeurs s'efforcent de la perfectionner. Il serait peut-être important que ces messieurs s'expliquassent sur les dates de ces différents perfectionnements, car on trouve au bureau des brevets d'invention un brevet par lequel M. Frascara, professeur de physique en Piémont, réclame la propriété des diaphragmes en papier préparé à l'acide nitrique, et qu'il appelle *papier xiloïdé*. Ce brevet date du mois de décembre 1854. Il est vrai que la disposition de son élément est différente, car il emploie pour liquides excitateurs un acide et une base (l'acide sulfurique ou nitrique et l'ammoniaque), et le charbon est plongé dans l'alcali tandis que l'acide est contenu dans un vase en fonte de fer qui devient pôle négatif.

D'un autre côté, il existe un brevet pris MM. Guillon et D'Artois dans lequel le chargement et le déchargement des piles Bunsen ordinaires s'opère par un moyen à peu près semblable à celui de MM. Jedlick et Csapo. Ce brevet a été pris en 1853. A qui revient la priorité de ces deux perfectionnements? C'est une question difficile à éclaircir, car il arrive bien souvent que la date des brevets n'indique pas celle des inventions.

MODIFICATIONS APPORTÉES AUX PILES A ACIDES.

Le prix très-élevé de l'acide azotique et son usure prompte rendent les piles de Bunsen d'un emploi tellement dispendieux qu'on ne peut guère les utiliser dans les applications mécaniques de l'électricité. Pourtant la grande quantité d'électricité qu'elles fournissent sous un petit volume devrait les rendre préférables à toutes les autres piles. On a donc dû rechercher le moyen de remplacer l'acide nitrique par un autre corps exciteur moins dispendieux; mais les ré-

sultats qu'on a obtenus jusqu'à présent, quoique présentant des avantages, n'ont pu encore faire renoncer à l'emploi de l'acide azotique. Quoi qu'il en soit, nous allons passer en revue les différents systèmes qui ont été proposés dans ce but :

Système de M. Le Roux. — « On sait, dit M. Le Roux, que dans la pile de Bunsen, le dégagement de l'électricité est dû principalement à la combinaison de l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau par le zinc avec l'oxygène dégagé par la source de ce gaz contenu dans le diaphragme, que cette source soit d'ailleurs de l'acide azotique, ou un corps, ou un mélange quelconque. Les expériences que j'avais entreprises à ce sujet m'amènèrent naturellement à penser que tout autre corps, capable de s'unir à l'hydrogène, pourrait jouer le rôle de l'acide azotique dans la pile de Bunsen. Or, il est un corps, le chlore, remarquable par son affinité avec l'hydrogène et qui semblait réunir les conditions nécessaires. Pour le vérifier, je mis, dans le diaphragme d'un élément et autour d'un charbon neuf, un mélange de peroxyde de manganèse et d'acide chlorhydrique étendu d'assez d'eau (moitié environ) pour ne plus émettre de vapeurs; j'obtins ainsi un courant de même intensité à peu près qu'avec l'acide azotique ordinaire. Si l'on élève un peu la température du mélange jusque vers 35° environ, de manière à activer le dégagement du chlore, celui de l'électricité augmente considérablement. Le dégagement de l'électricité est dû, dans ce cas, à la combinaison de l'hydrogène avec le chlore, combinaison qui régénère l'acide chlorhydrique. Avec la disposition actuelle des éléments, lorsqu'on opère avec une petite quantité de bioxyde de manganèse et à la température ordinaire, il se produit un affaiblissement assez rapide de l'intensité du courant qui diminue environ de moitié au bout d'une demi-heure. Cet effet tient à la précipitation dans le diaphragme de tout le

bioxyde de manganèse; de sorte que, l'oxyde interposé s'affaiblissant graduellement et n'étant plus renouvelé, la production du chlore diminue; il suffit alors, pour faire reprendre à la pile son énergie primitive, d'agiter le charbon de manière à troubler le mélange.

« Cette action du chlore explique ce qui se passe lorsqu'on remplace l'acide azotique dans la pile de Bunsen par l'acide chlorhydrique du commerce. On a pendant quelque temps un courant assez fort qui finit par se réduire à celui produit par la dissolution du zinc; on remarque aussi que la coloration de l'acide disparaît, parce qu'en même temps le chlore est absorbé.

« Lorsqu'on emploie de l'acide chlorhydrique à la place de l'acide azotique et de l'eau acidulée par l'acide sulfurique pour dissoudre le zinc, on remarque, lorsqu'une partie de l'acide sulfurique s'est mêlée à l'acide chlorhydrique à travers le diaphragme, un dégagement d'hydrogène sulfuré et souvent même un dépôt de soufre. Cet effet est dû à la décomposition de l'acide sulfurique par l'hydrogène à l'état naissant et à la faveur du courant.»

Nous trouvons, dans *Le Cosmos* du 21 octobre 1853, ce qui suit, par rapport à cette communication de M. Le Roux :

« Il y a déjà plusieurs mois qu'un employé du laboratoire de chimie de l'École polytechnique, a eu l'idée de substituer l'emploi de l'acide chlorhydrique dans la pile de Bunsen à l'emploi des acides sulfurique et nitrique. Cette substitution, qui serait excellente au point de vue économique, a été déjà expérimentée en grand dans les ateliers de M. Christoffe pour la galvanoplastie et chez M. Dubosc pour la reproduction de la lumière électrique. Les résultats de ces expériences sont satisfaisants, le courant est intense et suffisamment constant; mais il se dégageait beaucoup de vapeurs de chlore, et nous attendrons une dernière expé-

rience complètement décisive pour prononcer en dernier ressort. »

Système de M. Guignet. — M. Guignet pense que pour éviter les inconvénients qui résultent de l'emploi de l'acide azotique dans la pile de Bunsen, on pourrait substituer à cet acide les sels de peroxyde de fer, qui sont facilement réduits par l'hydrogène. Le corps oxydant qui lui paraît devoir être préféré, au point de vue de l'économie et de la simplicité des manipulations, est un mélange d'acide sulfurique et de peroxyde de manganèse qui ne dégage pas d'oxygène, il est vrai, à la température ordinaire, mais qui absorbe facilement l'hydrogène à l'état naissant. Il a fait au laboratoire de l'École polytechnique des expériences comparatives d'un même nombre d'éléments contenant, l'un de l'acide azotique, l'autre un mélange d'acide sulfurique et de peroxyde de manganèse; il a reconnu d'abord qu'il n'était pas nécessaire d'employer de l'acide sulfurique concentré. Il a pris de l'acide à 52°, tel qu'il sort des chambres de plomb avant la concentration. Quant au peroxyde de manganèse, il était en poudre grossière. Les zincs étaient amalgamés à la manière ordinaire. Dans ces conditions, voici les résultats qu'il a obtenus : La déviation produite sur l'aiguille des sinus a été exactement la même pour les deux piles. Toutes les deux ont décomposé la même quantité d'eau dans le même temps. Ainsi, le courant ne différait pas en intensité dans les deux cas. De plus, cette intensité restait constante jusqu'à ce que l'action de l'acide sulfurique sur le zinc fût épuisée.

D'après M. Guignet, l'emploi de ce nouveau système présenterait pour avantages : 1° une économie de 50 pour 100 sur les frais d'entretien, d'après les prix courants actuels des acides azotique et sulfurique et du peroxyde de manganèse; 2° la suppression des vapeurs rutilantes qui sont incommodes et même dangereuses pour les opérateurs.

En reprenant les expériences de M. Guignet, M. Le Roux a été loin de retrouver les mêmes résultats avantageux et il a reconnu, dit-il :

1° Que l'effet du bioxyde de manganèse, mêlé à l'acide sulfurique concentré, n'était pas comparable, à la température ordinaire, à celui qu'on obtient avec de l'acide azotique, et qu'il n'augmente pas sensiblement la production de l'électricité due à l'oxydation du zinc; de sorte que, dans ce cas, l'acide sulfurique contenu dans le diaphragme n'agit plus que comme conducteur;

2° Que, lorsqu'on a laissé plusieurs heures le mélange abandonné à lui-même, et qu'on vient à l'introduire dans la pile, on remarque pendant les premiers instants un courant presque aussi énergique qu'avec l'acide azotique, mais que l'intensité de ce courant décroît rapidement, de sorte qu'au bout de dix minutes, un quart d'heure au plus, il est aussi faible qu'il a été dit précédemment;

3° Que cette augmentation d'intensité que nous venons de signaler, étant le résultat d'un dégagement abondant d'oxygène, il convenait, pour augmenter la force de ce genre de pile, de la soumettre à une température élevée (75° environ).

D'après ces contre-expériences, il s'ensuivrait qu'il faudrait une température de 70 à 80°, pour que le mélange d'acide sulfurique et de manganèse proposé par M. Guignet, pût remplacer l'acide azotique dans la pile de Bunsen. Je ne sais néanmoins jusqu'à quel point on doit ajouter foi aux assertions de M. Le Roux, car, d'après des expériences répétées faites, il y a déjà longtemps, par M. Payerne, à Cherbourg, il paraîtrait, au contraire, que le mélange d'acide sulfurique et de peroxyde de manganèse, remplaçant le charbon et l'acide nitrique de la pile de Bunsen, aurait produit d'excellents résultats. Quoi qu'il en soit, ce système de pile que s'attribue M. Guignet, a été expérimenté bien longtemps avant lui, comme le témoignent les comptes rendus

des travaux de la Société des sciences naturelles de Cherbourg.

Autre système de M. Le Roux. — Dans les expériences qu'il avait faites pour s'assurer de la valeur du système de pile précédent, M. Le Roux avait reconnu qu'en trempant le charbon d'une pile de Bunsen, préalablement imprégné d'acide azotique, dans le vase poreux d'un élément de pile rempli d'acide sulfurique concentré, il obtenait un courant beaucoup plus intense que celui qui était fourni quand ce même vase était rempli d'acide azotique. Il en conclut naturellement qu'en mêlant à l'acide azotique des piles ordinaires de Bunsen, de l'acide sulfurique concentré, il devait obtenir un effet beaucoup plus énergique. C'est en effet ce que l'expérience lui démontra. Ce fait d'ailleurs s'explique facilement; car la grande affinité de l'acide sulfurique pour l'eau, fait que cet acide, mêlé à de l'acide azotique affaibli le déshydrate complètement et lui rend toute sa force. C'est absolument le même effet chimique que celui qui s'opère dans la fabrication de la poudre-coton, quand on prépare celle-ci dans un mélange d'acide nitrique et d'acide sulfurique.

Quand donc l'acide azotique des piles Bunsen est par trop affaibli, il suffit, pour stimuler son énergie, d'y mêler quelques gouttes d'acide sulfurique concentré.

Système de MM. E. Liais et L. Fleury. — MM. E. Liais et L. Fleury, dans un mémoire adressé par eux à l'Institut au mois de décembre 1852, ont fait connaître deux dispositions différentes qu'ils ont données à la pile de Bunsen, pour en augmenter d'une part la conductibilité intérieure et de l'autre la tension.

« Lorsqu'on supprime, dit M. Liais, le diaphragme dans une pile de Bunsen dont le charbon est poreux, et maintenu imprégné d'acide nitrique, la conductibilité intérieure est augmentée de cinq fois; ce qui, d'après les lois des courants

électriques, correspond à un accroissement semblable de surface, sans augmentation de dépense, comme dans ce dernier cas. Ce fait a été constaté par l'expérience suivante : Un élément ainsi modifié a fait porter 58 kilogrammes à un électro-aimant. Pour lui faire porter le même poids par l'accroissement de surface de l'ancienne pile, il a fallu réunir cinq éléments de Bunsen par leurs pôles semblables, de manière à former un élément de surface quintuple.

Pour maintenir imprégné d'acide nitrique le charbon poreux, MM. Liais et Fleury ont employé la disposition suivante :

Le cylindre de charbon, au lieu d'être percé de part en part comme ceux des piles Bunsen, est bouché à son extrémité inférieure; il forme alors une espèce de gobelet, et c'est dans ce gobelet qu'on verse l'acide nitrique. Le zinc, comme dans les piles de Grove enveloppe le charbon, et celui-ci plonge sans intermédiaire dans l'eau acidulée. Cette disposition n'est en définitive que celle de l'élément de Grove dans lequel le vase poreux serait constitué par du charbon.

Pour que l'effet avantageux de ce système soit bien manifeste, il faut que le charbon soit préparé et très-poreux. (Celui de cornue ne donne aucun résultat.) Dès lors l'acide nitrique filtrant plus facilement se trouve désoxygéné plus vite; mais si on obtient par ce moyen un plus grand dégagement d'électricité dans un temps donné, il y a une plus grande dépense d'acides, de sorte que la question économique ne se trouve pas résolue par cette disposition. Pour être juste, je dois dire que ce système avait été adopté antérieurement à la communication de MM. Liais et Fleury, par M. Duchenne, dans son appareil Volta-féradique. Seulement, le charbon, au lieu de former un gobelet, était disposé comme une assiette creuse.

M. Pulver-Macher, de son côté, avait également cons-

truit une pile de ce genre, mais en substituant la plombagine au charbon. Pour préparer de pareils diaphragmes, il prenait de la poix de charbon de terre qu'il moulait en forme de gobelet et qu'il imprégnait à plusieurs reprises de plombagine. Par l'effet d'immersions multipliées dans de la poix liquide et dans de la plombagine, il parvenait à rendre son diaphragme aussi peu poreux qu'il pouvait le désirer. Il a obtenu des effets très-avantageux de ces sortes de piles.

Dans l'autre disposition de MM. Liais et Fleury, les vases poreux sont rétablis à l'intérieur des charbons, comme dans les piles Bunsen; seulement, ces charbons sont entaillés d'une rigole circulaire dans laquelle se trouve l'acide nitrique. L'on charge du côté du charbon avec de l'acide sulfurique concentré, et du côté du zinc, avec de l'acide dilué comme à l'ordinaire. De cette manière, la conductibilité de la pile est presque la même que dans la pile de Bunsen, mais la tension est presque doublée. Si, au lieu de faire agir directement à l'aide d'un seul diaphragme l'acide sulfurique concentré sur l'acide à 12°, on interpose plusieurs diaphragmes, de manière à faire agir l'acide concentré sur un acide à un degré moindre, celui-ci sur un autre un peu plus étendu, et ainsi de suite jusqu'à l'acide à 12° environ dans lequel on plonge le zinc, on trouve qu'il y a un accroissement considérable de tension. Un élément de cette dernière pile se comporte donc, comme une pile de Bunsen, de plusieurs éléments de même surface, mais coûte beaucoup moins.

Système de M. Lavenarde. — Le système de M. Lavenarde consiste à remplacer l'eau acidulée et l'acide azotique des piles de Bunsen, par une dissolution de sel marin et de l'eau acidulée de manière que la dissolution saline soit avec le zinc et la solution acide avec le charbon. Les proportions sont 200 grammes d'eau contre 40 grammes de sel marin, et

400 grammes d'eau contre 8 d'acide. Dans une autre disposition de cette même pile, l'eau acidulée est remplacée par du carbonate de soude ou de potasse. Enfin, dans une troisième disposition, l'inventeur substitue l'hypochlorite de chaux à la dissolution saline.

Une pile ainsi combinée est loin d'avoir l'énergie des piles de Bunsen, mais en revanche le courant en est plus constant. Elle peut être employée dans les mêmes applications que la pile de Daniell.

Système de M. De la Rive. — M. De la Rive a démontré que l'absorption de l'hydrogène de l'eau décomposée dans la pile à eau acidulée pouvait être obtenue de la part même d'un corps solide. Ce corps solide est le peroxyde de plomb. Ainsi, en tassant du peroxyde de plomb en poudre, dans un diaphragme autour d'une lame de platine ou de charbon, et plongeant ce diaphragme dans un vase contenant un zinc et de l'eau acidulée, on forme un couple à un seul liquide qui est aussi énergique que les couples de Bunsen. Malheureusement le peroxyde de plomb est très-cher.

Système de M. Croissant. — Le perfectionnement que M. Croissant, pharmacien, de Laval, a apporté à la pile Bunsen, consiste à recouvrir d'oxyde de tungstène le charbon qui plonge dans l'acide nitrique et de le calciner après qu'il a été ainsi enduit. La pile acquiert alors, assure-t-il, une tension considérable, mais la réaction qui se produit est difficile à expliquer.

Système de l'abbé de Laborde. — M. l'abbé de Laborde, voulant utiliser la réaction électrique qui se manifeste au moment de la combinaison de l'acide sulfurique avec l'eau, réaction qu'on néglige toujours, puisqu'on fait d'avance ce mélange, dispose la pile de manière à ce que cette réaction s'effectue au travers d'un diaphragme. Voici, en conséquence, comment il dispose sa pile. On verse de l'eau pure dans le vase qui contient le zinc, puis on y plonge un dia-

phragme cylindrique en porcelaine dégourdie, dans lequel on a mis de l'acide sulfurique étendu de deux fois son volume d'eau; on introduit dans ce diaphragme le vase, le charbon ou la lame de platine qui doit fournir l'appendice polaire ¹. Le courant qui résulte de cette pile est très-énergique et se soutient à peu près constant pendant plusieurs jours. Ce courant ne provient pas seulement du zinc qui plonge dans l'eau, mais aussi, comme je l'ai déjà dit, de l'action que l'acide sulfurique exerce sur l'eau à travers le diaphragme, action dans laquelle l'acide sulfurique prend l'électricité positive, et l'eau, l'électricité négative; en sorte que cet appareil simple se compose, par le fait, de deux couples agissant dans le même sens, comme l'élément de Bunsen. A mesure que l'action de l'acide sulfurique sur l'eau diminue, celle de l'eau sur le zinc augmente par l'acide dont elle s'empare peu à peu, et cette compensation progressive contribue à maintenir au même degré la force du courant.

M. l'abbé de Laborde a essayé l'acide sulfurique concentré; mais outre qu'il est moins bon conducteur, il se décompose, et l'hydrogène sulfuré qui s'exhale, rend très-incommode le maniement de la pile; il faut qu'il contienne assez d'eau pour échapper à une décomposition qui porte alors presque entièrement sur l'eau; il se dégage encore, il est vrai, un peu d'acide sulfureux, mais ce dégagement indique une action favorable, car l'hydrogène naissant tend à envelopper d'une mousse gazeuse la paroi extérieure du vase de cuivre (quand l'appareil est disposé pour la galvanoplastie,) et à former ainsi un obstacle à la circulation électrique. Cet hydrogène est enlevé par l'acide sulfurique qui

1. Comme M. l'abbé de Laborde destine principalement sa pile à la galvanoplastie, il substitue au charbon ou à la lame métallique un vase de cuivre contenant la solution saturée de sulfate, et dans lequel plonge la lame métallique servant d'appendice polaire.

perd à cela un équivalent d'oxygène; de là, la production d'acide sulfureux.

Quand on emploie ces piles pour la galvanoplastie, on peut réunir en pile plusieurs de ces appareils ainsi construits, en faisant communiquer la plaque métallique qui plonge dans le bain avec le zinc de l'appareil suivant et ainsi de suite; le métal du bain se réduit dans chaque cellule, et l'on obtient ainsi de chaque couple un effet utile et aidé par les effets de tous les autres. Il n'est pas nécessaire que chacun d'eux contienne les mêmes éléments: on peut cuivrer dans le premier, argenter dans le second, dorer dans le troisième, et ces couples, formés d'anodes solubles, et de liquides différents, étant disposés par série, ne s'en prêteront pas moins un mutuel appui. On pourra adopter cette disposition, toutes les fois qu'on voudra donner au dépôt métallique telle ou telle qualité dépendant d'un courant plus fort, ou lorsque les solutions ne conduisent pas assez facilement l'électricité; mais généralement un seul couple suffit.

Les vases de cuivre formant les anodes solubles, se détruisent promptement. Pour éviter cet inconvénient, on applique sur leur contour intérieur une feuille de cuivre, cette dernière est seule attaquée et fournit le cuivre à la solution. On peut facilement la renouveler lorsqu'elle est hors de service.

Système de M. Froment. — M. Froment a fait usage de couples d'un emploi facile. Chaque couple est formé par un vase A (fig. 16 pl. I), contenant un vase poreux QQ', auquel est mastiqué un long tube de verre TT'. Un cylindre de zinc Z extérieur plonge dans une solution légère d'eau acidulée. La même eau acidulée remplit en partie le diaphragme et le tube; une lame de plomb P, qui n'est pas attaquée par l'eau faiblement acidulée, sert d'électrode négative et fournit l'électricité positive au dehors. Ce couple fonctionne

rait ainsi comme un faible couple ordinaire, mais la dissolution extérieure de la case du zinc se chargerait de sulfate de zinc. Le vase de Mariotte B donnant un niveau constant *m o* dans le haut du tube TT', fournit le liquide nécessaire pour renouveler la dissolution; ce liquide suinte au travers du vase poreux en vertu d'un excès de pression, puis vient dans le vase A. Un siphon *abc* amène le liquide du fond du vase A dans un petit vase D, et au fur et à mesure que le liquide s'infiltre au travers du vase poreux Q, une même portion de dissolution se rend dans le vase D avec le niveau constant *n*, puis tombe dans le vase extérieur C. Il résulte de là que le liquide du couple est toujours renouvelé et que c'est la portion de dissolution chargée de sulfate de zinc dans le couple qui s'écoule au dehors.

QUESTION ÉCONOMIQUE DES PILES A ACIDES.

Lorsqu'une réaction chimique, provoquée dans un but quelconque, offre pour résidu des substances susceptibles d'être utilisées, elle n'est plus une dépense et peut être appliquée avec avantages; mais lorsque, pour créer un effet physique, on est obligé d'allier ensemble des corps dont la combinaison n'est susceptible d'aucun produit vendable, la spéculation ne peut être que mauvaise. Or, c'est précisément là le cas des piles à acides, dont le résidu est d'une part de l'acide azotique hydraté et de l'autre du sulfate de zinc, qui n'a aucune valeur. Transformer ces matières en produits vendables, ou combiner la pile de manière à les fournir directement : telle est la question qui depuis longtemps occupe les chimistes et les physiciens, mais qui est encore loin d'être résolue. Néanmoins plusieurs essais ont été tentés, et nous allons les passer successivement en revue.

Procédé d'Archereau.—Le sulfate de zinc est un produit de nulle valeur, ou à peu près, comme nous l'avons déjà

dit, mais il n'en est pas de même du sulfate de cuivre, qui, depuis la suspension des ateliers d'affinage, est devenu d'un prix exorbitant. Que faut-il changer à la pile de Bunsen, pour obtenir du sulfate de cuivre au lieu du sulfate de zinc ? telle a été la question que s'est faite M. Archereau, et à laquelle il a répondu en remplaçant le zinc de sa pile par du cuivre. Il a obtenu en effet, de cette manière, de très-beaux cristaux de sulfate de cuivre. Mais la question économique était-elle pour cela résolue?... Pour le savoir, il fallait calculer si le sulfate de cuivre obtenu pouvait compenser le prix du métal usé, ou si l'action physique par son importance pouvait balancer la différence. Or, l'expérience a prouvé qu'en somme, les avantages de ce système étaient loin de compenser la dépense qui était, à peu de chose près, la même que celle des piles ordinaires. En effet, ces sortes de piles ne donnaient, volume pour volume, que le quart de l'électricité produite par les piles à zinc.

Système de MM. Glukeman, Payerne, Frascara, etc. — Dans le système adopté par ces Messieurs, le zinc de la pile de Bunsen est remplacé par le fer, tantôt en copeaux, tantôt en limaille, tantôt constituant le vase extérieur lui-même. On obtient alors pour résidu du sulfate de fer ou de la couperose verte du commerce. M. Beckensteiner, inventeur d'un système analogue, mais plus compliqué dans ses détails de disposition, prétend même que la réaction de l'acide azotique sur le sulfate de fer, ainsi déposé comme résidu, forme un sulfate rouillé de fer qui est recherché comme mordant pour les teintures, et que l'on prépare ordinairement directement en versant de l'acide azotique sur le sulfate de fer. Reste à savoir si les avantages résultant de ce résidu sont susceptibles d'être contre-balancés par l'action moins énergique que l'on obtient, et qui est due au peu d'énergie de l'oxydation.

Système de M. Watson. — M. le docteur Watson croit

être parvenu à produire pour rien ou à très-bas prix la lumière électrique, en faisant servir le courant de la pile qui illumine les charbons, à préparer des matières colorantes dont la vente couvre, dit-il, les dépenses d'entretien de la pile. « Si nous en croyons le *Scientific American Journal*, dit le *Cosmos*, la matière précipitée par la pile de M. Watson serait du chromate de plomb au lieu de sulfate de zinc sans valeur, obtenu jusqu'ici. Cela supposerait que dans la nouvelle pile on a substitué des lames de plomb aux lames de zinc et le bichromate de potasse à l'acide sulfurique. Nous n'osons pas croire à cette économie merveilleuse, et nous avons chargé un ami de nous procurer une pile du nouveau modèle. Il n'a pas été plus heureux que M. Fisher; il a bien vu, apposée sur les murs de Londres, en grosses capitales, une affiche avec ces mots : *Electric power and color Company*; mais il n'a pu rencontrer nulle part, pas même à Wandsworth, où on les disait établis, ni les directeurs de la compagnie ni même M. Watson.

Système de M. Martins-Roberts. — La pile de M. Martins-Roberts se compose de cinquante plaques d'étain de six pouces de hauteur sur quatre pouces de largeur, placées chacune entre deux plaques de platine de mêmes dimensions. Les plaques d'étain avec leur enveloppe en platine plongent dans des auges en porcelaine de deux pieds de profondeur, remplies d'acide nitrique étendu d'eau. La profondeur de ces auges peut paraître effrayante, mais elles ont été établies ainsi pour recueillir un produit résidu qui, selon l'inventeur, doit couvrir à lui seul les frais de production de l'électricité. Sous l'influence, en effet, du courant l'étain donne naissance à un oxyde d'étain hydraté qui tombe à mesure au fond des auges et se combine avec de la soude, en donnant naissance à un stannate de soude, sel employé en grande quantité, comme mordant, dans la teinture des toiles et cotons.

L'intensité de cette pile de cinquante éléments était très-considérable : on s'en est servi pour produire la lumière électrique, et elle a donné de très-brillants effets. Essayée pour la décomposition de l'eau, elle a donné neuf pouces cubes par minute du mélange d'oxygène et d'hydrogène ; son action est sensiblement constante pendant cinq ou six heures, et on peut la comparer, sous ce rapport comme sous celui de l'intensité, à une pile de Grove dont les éléments seraient en même nombre et de même grandeur.

Système de M. Poggendorf. — D'après M. Poggendorf, en prenant trois parties de bichromate de potasse, quatre d'acide sulfurique et 18 d'eau, on a dans les piles de Grove ou de Bunsen un effet aussi énergique qu'avec l'acide azotique ; il se forme un alun de chrome dans la dissolution après la réduction complète de l'acide chromique, et si l'on reprend les résidus ; on peut reformer du bichromate de potasse sans perdre le sel de chrome.

Système de MM. de La Valette et Dulaurier. — Dans la pile imaginée par MM. de La Valette et Dulaurier la disposition des éléments polaires est analogue à celle des piles à hélicés de Wollaston. Seulement, au lieu d'avoir l'eau acidulée pour liquide excitateur, c'est une dissolution de chlorure de zinc qui résulte elle-même d'une action chimique utilisée électriquement. Le chlorure de zinc peut résulter en effet de la réaction de l'eau acidulée avec de l'acide chlorhydrique sur le zinc d'une pile dans laquelle ce liquide serait substitué à l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique. Or, ce chlorure de zinc entrant comme liquide excitateur dans une pile composée d'un couple zinc et cuivre disposé en hélice forme un oxychlorure de zinc susceptible d'être employé dans les arts comme du blanc de zinc.

Le dégagement électrique de cette pile peut être considérablement activé par l'échauffement du liquide.

Comme on le voit, les systèmes économiques ne manquent

pas; mais, les avantages paraissent encore si peu certains qu'ils n'ont pas, en général, été adoptés. D'un autre côté, il ne faut pas non plus par trop s'exagérer la dépense des piles Bunsen ordinaires. Il résulterait, en effet, d'un calcul de M. Deleuil que, pour certaines applications, cette dépense serait bien minime. Ainsi, pour les travaux de nuit des docks Napoléon, où huit cents ouvriers étaient employés et où les tranchées étaient éclairées par deux régulateurs de lumière électrique, alimentés chacun par une pile de cinquante éléments (grand modèle,) le prix de revient de cet éclairage ne dépassait pas 38 fr. pour chaque nuit, ce qui, réparti sur 800 ouvriers, fait moins de 5 centimes par chaque ouvrier. La lumière était vive, parfaitement répartie, et aucun accident n'est venu interrompre la campagne qui a duré plus de quatre mois.

PILES DE DANIELL.

Les piles de Daniell, si importantes par leur constance, leur longue durée d'action et leur absence d'odeur pour les applications mécaniques de l'électricité, avaient, dans l'origine, comme les piles de Bunsen, leur pôle positif en dehors et leur zinc au dedans du vase poreux. Dès qu'on put reconnaître les avantages du système contraire, on leur appliqua le même retournement; de telle sorte, qu'aujourd'hui, les piles de Daniell ne diffèrent en forme des piles de Bunsen que par la substitution au charbon d'une tige de cuivre munie d'une grille. Néanmoins, plusieurs précautions doivent être prises pour leur bon fonctionnement. Il faut d'abord que la grille ou godet, percée de trous et destinée à soutenir les cristaux de sulfate de cuivre à la partie supérieure du liquide, soit construite de façon à ne pas toucher les parois du vase poreux, sans quoi, le dépôt de cuivre qui se forme pendant le travail de ces sortes de piles, la soudè-

rait fortement au vase poreux, et il serait impossible plus tard de l'enlever. En second lieu, il faut, par la même raison, que toutes les tiges de cuivre ne descendent pas trop profondément dans le vase. Enfin, comme les éléments de ces sortes de piles ne sont pas souvent employés isolément, il faut que les tiges de cuivre soient soudées aux appendices polaires des zincs.

Pour satisfaire à la première de ces conditions, plusieurs constructeurs, entre autres M. Paul Garnier, font leur grille en gutta-percha, d'autres la vernissent avec de la gomme laque, d'autres, comme M. Mirand, en font un véritable godet en porcelaine dont les rebords viennent s'appuyer sur ceux du vase poreux.

La manière de charger la pile n'est pas non plus indifférente, et, à ce sujet, je dois dire dès en commençant, que contrairement à l'avis de certains physiciens, il faut éviter de mettre de l'acide ou du sel avec l'eau qui doit oxyder le zinc. A quoi bon en effet cet acide et ce sel... ?

Le sulfate de cuivre en contact avec le zinc, par suite de sa filtration à travers les pores du vase poreux, n'abandonne-t-il pas son acide sulfurique dans une proportion convenable pour le dépôt de cuivre qui se fait au pôle positif ? Pourquoi donc troubler cette double réaction par un excès d'acide ? Depuis longtemps je me sers des piles de Daniell, et pour les charger, je n'emploie jamais que de l'eau pure, aussi bien pour les vases poreux que pour les vases extérieurs ; la seule différence que je fais pour la charge de ces deux systèmes de vases, c'est que je ne remplis les derniers qu'à moitié, tandis que les autres sont entièrement pleins pour noyer les cristaux de sulfate de cuivre que l'on place sur les grilles. Une pile ainsi chargée ne donne, il est vrai, de l'électricité qu'au bout de six heures, et le dégagement électrique augmente progressivement pendant trois jours, mais après qu'il a atteint son maximum le courant produit

est plus constant que quand on a ajouté de l'acide à l'eau du vase extérieur.

Une pile de Daniell de huit éléments dont le courant n'est pas mis très-souvent en activité peut fournir de l'électricité pendant six semaines sans qu'il soit besoin de s'en occuper en aucune façon. Mais quand le courant est constamment fermé, il faut charger la pile tous les huit jours. Pour cela, il n'est besoin que de jeter sur les grilles quelques cristaux de sulfate de cuivre (50 grammes environ chaque fois). Du reste, comme la dépense d'électricité dépend de la résistance des circuits, il est difficile d'assigner une période fixe pour renouveler le sulfate de cuivre ; toutefois, l'inspection de la pile suffit pour reconnaître quand il est urgent de le faire. Si la dissolution de sulfate de cuivre est restée bleue, il n'est pas besoin de remettre des cristaux ; si, au contraire, elle devient incolore, il faut immédiatement et sans retard recharger la pile.

Comme l'eau qui tient en dissolution le sulfate du cuivre passe en partie dans les vases de verre, il devient urgent de temps en temps (tous les deux mois environ) de retirer l'excès d'eau qui s'y trouve, ce que l'on fait à l'aide d'une petite seringue. Par la même raison, il est quelquefois nécessaire de verser quelques gouttes d'eau dans la dissolution pour réparer les pertes qu'elle a faites. Cependant, il arrive rarement qu'on soit obligé de le faire, surtout si on abandonne la pile à elle-même jusqu'à ce que la dissolution se décolore ; car, alors, il y endosmose du liquide extérieur à l'intérieur du vase poreux, et le liquide de celui-ci, au lieu d'avoir son niveau abaissé, se trouve au contraire l'avoir élevé. Dans ce cas, il est évident qu'il n'est pas besoin de retirer de l'eau des vases extérieurs ni d'en ajouter dans les vases poreux, puisque la permutation se fait par suite des réactions physiques elles-mêmes. Toutefois, ces effets peuvent varier suivant la nature des vases poreux, et c'est pour

cela que j'ai cru devoir indiquer le moyen d'y remédier, le cas échéant. On a déjà compris, sans doute, que c'est à cause de ces infiltrations que les vases extérieurs ne doivent être remplis d'eau qu'à moitié.

L'entretien d'une pile de Daniell de huit éléments ne revient pas à plus de 4 francs par an, quand le courant n'est pas constamment fermé. Dans le cas contraire, il peut s'élever jusqu'à 10 et 12 francs, sans compter l'usure des zincs. Mais ceux-ci, quand ils sont suffisamment épais, peuvent durer facilement deux ans. Il faut seulement avoir soin, au moins une fois par an, de nettoyer tous les vases et de gratter les zincs pour leur ôter les dépôts qui s'y trouvent incrustés.

Les résidus de la pile de Daniell sont, d'une part, du sulfate de zinc, comme dans les piles de Bunsen ; mais, d'autre part, du cuivre à l'état natif qu'on peut vendre avantageusement. Quand les piles sont bien faites, ce dépôt de cuivre forme des espèces de stalactites volumineux à l'extrémité des tiges de cuivre qui plongent dans la dissolution.

Les piles de Daniell sont employées, comme je l'ai déjà dit, pour les télégraphes électriques, l'horlogerie électrique, les sonneries, en un mot, tous les appareils qui marchent d'une manière régulière, à grande distance et sans exiger une grande force électrique. Les conducteurs peuvent être fins et très-longs, sans que la force du courant éprouve un notable affaiblissement.

En Allemagne, les piles de Daniell employées pour les télégraphes sont, pour ainsi dire, microscopiques : 20 éléments tiennent dans une boîte de 30 centimètres carrés, et pourtant ils peuvent faire marcher les télégraphes à une distance considérable. En France, on préfère les grands éléments. C'est sans doute pour éviter de les charger souvent, car les constructeurs de nos télégraphes doivent savoir que, d'après les lois de Wheatstone, la grandeur des éléments ne signifie absolument rien, relativement à la ten-

sion des courants électriques. Or, ce n'est que la tension du courant qui est nécessaire pour obtenir des effets mécaniques à grande distance.

Système de MM. Parelle et Vérité. — Lorsque les piles de Daniell doivent fournir une action électrique continue et qu'elles se composent d'un petit nombre d'éléments, comme par exemple quand on les emploie pour l'horlogerie électrique, leur charge se trouve assez promptement épuisée, et il devient nécessaire de la renouveler souvent. Pour éviter ce soin, que l'on pourrait quelquefois oublier de prendre, M. Parelle, en 1852, imagina une disposition qui permet à ces piles de fonctionner pendant un temps très-long (six mois environ), sans qu'on ait à s'en occuper. Cette disposition consiste à surmonter les vases poreux dans lesquels se trouve la dissolution de sulfate de cuivre, d'un ballon en verre rempli de cristaux de sulfate de cuivre imprégnés d'eau. Le goulot de ce ballon plonge dans le vase poreux comme on le voit *fig.* 13, pl. 1, et comme la dissolution cuivrée est plus lourde que l'eau ordinaire, elle sature toujours la dissolution du vase poreux à mesure que celle-ci s'affaiblit sous l'influence électrique.

Cette disposition, comme on le comprend aisément, revient à l'emploi d'un très-grand vase poreux au milieu duquel se trouverait une grille surmontée d'une quantité considérable de cristaux de sulfate de cuivre. Toutefois un phénomène assez curieux se manifeste dans ces sortes de piles. C'est un affaiblissement assez notable du courant qui en provient.

Supposons, pour fixer les idées, que deux éléments de Daniell, montés d'après la méthode ordinaire soient à peine suffisants pour faire marcher une horloge électrique. En plaçant au-dessus d'eux les ballons remplis de sulfate de cuivre, leur force électrique se trouvera diminuée au point de nécessiter la présence d'un troisième élément, pour

exercer le même effet électro-mécanique. Ce phénomène est probablement de la même nature que celui par lequel les piles Bunsen sont moins énergiques quand les vases poreux renfermant l'acide nitrique se trouvent hermétiquement bouchés. C'est pour éviter cet inconvénient que je pratique un trou dans les vases poreux des éléments, montés suivant le système que j'ai indiqué page 77.

M. Parelle, dans le brevet qu'il a pris, indique encore une autre disposition supplémentaire pour maintenir toujours le liquide des vases extérieurs au même niveau; mais comme cette disposition compliquerait la pile sans qu'il en résultât de grands avantages, je n'en parlerai pas davantage.

M. Vérité, qui sans doute ignorait les droits de priorité de M. Parelle, avait fait figurer à l'Exposition de 1855 un modèle de ces piles. Ce modèle a pu faire fonctionner les appareils électro-magnétiques qu'il avait exposés pendant toute la durée de l'Exposition.

Une disposition analogue a également été adoptée par M. Moulleron, seulement, le réservoir de sulfate de cuivre, au lieu de surmonter directement les vases poreux était, monté sur un support disposé à hauteur convenable, et c'était un tube à robinet qui établissait la communication entre les deux vases.

Pile de M. Wheatstone. — Dans la pile de M. Wheatstone, l'élément négatif est un amalgame pâteux de zinc, l'élément positif, un fil de cuivre comme dans la pile de Daniell. L'amalgame de zinc occupe le vase poreux, et le sulfate de cuivre est placé dans le vase extérieur. C'est alors l'acide sulfurique du sulfate qui attaque le zinc et qui provoque la réaction électrique, sans qu'il y ait eu un dégagement électrique préalable. Le courant de cette pile reste constant tant que la dissolution de sulfate est maintenue à un degré convenable de saturation. L'avantage que présente cette pile est de pouvoir utiliser tous les morceaux de zinc des

autres piles qui se trouvent toujours perdus. Elle n'est du reste qu'une pile de Daniell à un seul liquide.

Autres systèmes de piles de Daniell. — M. Gérard, constructeur d'instruments de physique à Liège, s'est imaginé de remplacer le cylindre de zinc des piles de Daniell ordinaires par une spirale de fil de zinc, et la lame de cuivre également par une spirale de fil de cuivre. L'inventeur prétend supprimer par ce moyen les étincelles des interrupteurs du courant. Reste à savoir si cette absence d'étincelles n'est pas plutôt la conséquence de la faiblesse d'action de la pile, car la surface du zinc dans la disposition qu'il a adoptée est loin de représenter en grandeur la surface des zincs que l'on emploie ordinairement. Si les spires de l'hélice de zinc eussent été très-rapprochées les unes des autres, le contraire aurait eu lieu, et dès lors les avantages de ce système auraient été plus manifestes.

D'un autre côté, le même inventeur a combiné une disposition analogue à celle de M. Parnelle pour établir des niveaux constants entre les liquides des différents éléments, mais malgré toute ma bonne volonté, je n'ai pu reconnaître aucun avantage dans cette disposition.

PILES A UN LIQUIDE.

Si les piles à deux liquides ont détrôné les piles de Volta et de Wollaston, dans la plupart des applications de l'électricité, la disposition simple et commode de ces dernières, et surtout la facilité qu'elles donnent d'augmenter considérablement le nombre et la grandeur des éléments, les font encore rechercher dans certains cas. Aussi ont-elles été dans ces derniers temps l'objet de perfectionnements importants.

Pile de Smée et de Wollaston. — Dans sa construction la plus simple l'élément de Smée se compose d'une large lame

de platine, interposée entre deux lames de zinc amalgamé dont la largeur est seulement le tiers de celle de la lame de platine. Ces deux lames isolées l'une de l'autre par des cales en bois plongent dans l'eau acidulée, et les bandes métalliques en rapport avec elles déterminent les deux pôles. Pour obtenir la dépolarisation du couple, la lame de platine est elle-même platinée, c'est-à-dire recouverte d'un dépôt de platine pulvérulent.

En somme, cette pile ne diffère de celle de Wollaston que par la platinisation de la lame positive qui donne au dégagement électrique une plus grande constance et une plus grande régularité. Car la substitution du platine au cuivre de la pile de Wollaston n'a que peu d'importance puisque ces métaux n'entrent dans la pile que pour partager la polarité du liquide; tout métal ou tout corps conducteur peu attaquable à l'eau acidulée, peut être employé dans le même but. C'est ainsi que le plomb, le charbon, le cuivre platiné, l'aluminium, le fer rendu passif, etc., etc., ont pu être substitués à la lame de platine de la pile de Smée, sans différence d'action électrique autre que celle provenant de la dépolarisation que ces lames pouvaient opérer.

On a cherché aussi à modifier la disposition des éléments, tantôt en faisant de l'auge elle-même contenant les liquides l'électrode négative du couple, tantôt en plaçant les éléments horizontalement dans des cuvettes, tantôt en substituant à la couche du platine pulvérulent pour la dépolarisation des électrodes, du charbon réduit en poudre; tantôt en interposant entre les couples zinc, cuivre ou platine du sable ou autres substances poreuses imprégnées du liquide excitant, tantôt en variant la nature des liquides, tantôt en disposant les éléments de manière à constituer une chaîne portative. Chaque inventeur prétend que son système est le meilleur. Mais pour nous qui n'avons pas de parti pris, ces différents systèmes pourront avoir chacun leurs avantages

et être employés dans des cas différents. Nous allons en conséquence les passer rapidement en revue.

Pile de Bagration.— Cette pile a une action assez lente, mais elle peut fonctionner pendant longtemps. Voici en quoi elle consiste : dans un vase en bois ou en faïence on place deux lames métalliques, l'une en zinc, l'autre en cuivre, de manière à ce qu'elles ne se touchent pas, on remplit le vase de sable et on humecte le tout avec une solution de sel amoniac. Il suffit de verser de temps à autre de cette dissolution pour maintenir le courant électrique pendant des semaines et des mois ; il dure jusqu'à la destruction du zinc. •

On peut donner à ces couples des dimensions plus ou moins grandes (seaux, tonneaux, etc.) ; on multiplie les surfaces métalliques en plongeant plusieurs lames dans le même vase. On peut en outre former une pile de plusieurs éléments et même de plusieurs éléments dans le même vase.

L'inconvénient de ces sortes de piles, c'est que le sable, en faisant corps avec le sel quand celui-ci vient à se sécher, forme des espèces de croûtes peu propres au fonctionnement de la pile.

Néanmoins comme ce système est très-économique, on peut l'employer concurremment avec les piles de Daniell.

Pile à sable. — La pile la plus employée en Angleterre sur les lignes télégraphiques est celle de M. Cooke, construite dans le système de Bagration. Elle consiste en une auge en bois dure, en chêne, par exemple, longue de 75 centimètres, large de 14 centimètres, et divisée par des cloisons d'ardoise en vingt-quatre cellules, ce qui donne à chaque cellule une largeur d'environ 3 centimètres. L'intérieur de l'auge est rendu parfaitement imperméable par une ou plusieurs couches de ciment ou de glu marine. Les éléments électro-négatifs sont des plaques de zinc amalgamé ; ces plaques ont 112 millimètres de hauteur sur 87 millimèt.

de largeur, l'épaisseur du zinc est de 5 millimètres et demi. Les plaques sont assemblées en couple cuivre et zinc par des bandes de cuivre de 25 millim. de largeur, soudées ou mieux rivées ensemble. Un simple zinc commence la série et forme le pôle négatif par le fil qui s'y rattache; un simple cuivre la termine et forme le pôle positif. Chaque couple intermédiaire est placé à califourchon sur les cloisons d'ardoise, et les deux plaques dont il se compose entrent dans les deux cellules contiguës. Les extrémités supérieures des couples sont vernies pour qu'elles se maintiennent propres et qu'elles échappent à la corrosion. Les cellules sont remplies jusqu'à 25 millimètres du bord supérieur, avec du sable que l'on imbibe d'une petite quantité d'eau acidulée par une partie d'acide sulfurique concentré, sur quinze parties d'eau; il suffit que le sable soit rendu humide. Dans cet état, la pile peut facilement être transportée d'un lieu dans un autre; ce qui serait difficile si on remplissait les cellules d'eau acidulée. Il vaut beaucoup mieux augmenter le nombre des couples en se servant d'une solution plus faible que de recourir à un liquide plus acidulé. Le nombre des couples doit d'ailleurs être proportionné à la distance entre les stations; il est en général de 24 pour une distance de dix à quinze milles anglais, de 48 pour une distance de quarante à soixante milles anglais, et une pile neuve montée avec soin peut fonctionner pendant six ou huit mois, si les dépêches ne sont pas trop multipliées; il en est qui ont fait un excellent service pendant plus d'une année; la seule opération qu'on ait eu à leur faire subir, a consisté dans l'addition d'un peu d'eau acidulée; on renouvelait aussi le sable quand il était trop sali, après l'avoir expulsé par un fort jet d'eau.

Elément de M. Prax. — L'élément combiné par M. Prax, professeur de physique, n'est aussi qu'une modification de la pile de Bagration. Il se compose d'une plaque de zinc et

- d'une plaque de cuivre séparées par 5 doubles de flanelle et deux diaphragmes de papier imbibés des liquides excitateurs. Pour charger cette pile, on commence d'abord par humecter les deux surfaces métalliques avec une dissolution de sel ammoniac, puis on place sur la lame de zinc un des morceaux de flanelle imbibée de cette même dissolution. On place au-dessus de cette flanelle un diaphragme en papier également humecté, et au-dessus de celui-ci deux morceaux de flanelle imbibée de la dissolution saline et de plus chargée d'une couche de sel ammoniac pulvérisé; au-dessus de ces deux doubles de flanelle on place un nouveau diaphragme de papier, et au-dessus de lui les deux derniers doubles de flanelle qui sont seulement imprégnés d'eau. C'est sur ce matelas de laine qu'est placée la plaque de cuivre du côté bien entendu où elle a été mouillée. On assure la bonne adhérence de tous les éléments qui composent cette pile à l'aide d'un poids que l'on place sur la plaque de cuivre. Il paraîtrait, d'après l'auteur, qu'une pile ainsi disposée aurait beaucoup d'avantages sur les autres piles à courants faibles. Par une disposition un peu différente, l'inventeur a pu donner à ces piles une énergie beaucoup plus grande et suffisante pour qu'avec 5 éléments on puisse avoir de belles étincelles et brûler des fils de platine.

Dans cette disposition on n'emploie que quatre morceaux de flanelle au lieu de cinq; ils sont tous trempés dans la dissolution de sel ammoniac et recouverts d'une couche d'un sel excitant. Les deux couches qui sont placées du côté du zinc sont composées de verdet pulvérisé, les deux autres de sel ammoniac également pulvérisé, mais elles sont séparées par un diaphragme de papier humecté qui empêche les deux corps de se mélanger. On pourrait, comme on le conçoit facilement, n'employer que deux morceaux de flanelle au lieu de quatre; mais l'action électrique serait moins durable.

Élément de M. Mœnig. — Cet élément n'est encore qu'une modification de la pile à sable que nous avons décrite; seulement au lieu de sable, l'inventeur emploie des oxydes, acides ou sels métalliques, secs et réduits en poudre qu'il mélange en quantité à peu près égale avec de l'amidon, de manière à former une espèce de pâte poreuse. Lorsque cette pâte est sèche, aucune action électrique ne se manifeste, mais aussitôt qu'on l'arrose avec une dissolution excitante, un dégagement électrique se manifeste d'autant plus énergiquement que la pâte est plus poreuse; c'est pourquoi M. Mœning introduit quelquefois dans cette pâte du verre pilé ou de la silice. Si les proportions d'oxyde ou sels métalliques secs sont plus considérables, que celles d'amidon, le dégagement électrique est plus considérable, mais le courant est moins constant. Dans le cas contraire, le courant est plus faible, mais aussi plus constant.

Pile de MM. Fabre et Kunemann. — Cette pile se compose de plaques de zinc disposées verticalement et revêtues d'un côté d'une plaque de plomb, et de l'autre d'un diaphragme en laine doublé de toile. Les intervalles sont remplis par de la poussière de charbon de cornue, et c'est sur cette poussière de charbon qu'est versée goutte à goutte l'eau acidulée destinée à alimenter la pile.

Cette pile, comme on le voit, n'est autre chose qu'une pile de Volta renversée, dans laquelle l'élément cuivre est remplacé par le charbon, car la lame de plomb n'intervient que pour prendre la polarité du charbon. Mais elle offre l'immense avantage de pouvoir être montée d'une manière permanente et commode. Il suffit pour cela de serrer tous les couples entre deux fortes planches de bois au moyen de deux colliers de fer et de les placer ensuite ainsi empilés sous le réservoir d'eau acidulée.

Tel est le principe de cette nouvelle pile de M. Fabre de la Grange que nous avons représentée vue en plan fig. 14,

pl. I. Dans son exécution, plusieurs précautions doivent être prises. Il faut d'abord que les intervalles des couples soient garnis sur les côtés de la pile d'un bourrelet de glu marine, afin que les liquides filtrant à travers le charbon pulvérisé ne suintent pas de côté et n'établissent pas une communication liquide entre les différents couples ; il faut ensuite une disposition particulière pour l'écoulement lent et uniforme du liquide excitateur. Il suffit pour cela de disposer au travers des couples sur une surface bien droite et de niveau une bande de toile sur laquelle appuie le fond d'un sac en feutre ayant la forme d'une trémille. Ce sac est soutenu sur une planche en bois légèrement inclinée, et le liquide, en suintant à travers, se trouve réparti également entre tous les éléments par l'effet de l'endosmose opérée par la bande de toile.

D'après le dire des inventeurs, une pile ainsi disposée peut marcher pendant six mois sans interruption et avec régularité.

Pile de M. Weare. — Dans l'élément de M. Weare, les plaques zinc et cuivre de la pile de Wollaston sont recouvertes de plâtre ou d'un ciment poreux, et adaptées sur un cadre de bois recouvert de glu marine dont l'intérieur sert de cellule pour le liquide excitateur. Dans ces cellules se trouve placée de la paille hachée très-finement, du papier mâché ou même du carton en pâte non durcie qui, dans cette pile, remplace le sable des piles à sable que nous avons décrites.

Pile de Muncke. — MM. Faraday et Muncke ont employé une disposition de pile analogue à celle de Wollaston, mais avec cette distinction que les éléments ont moins de surface et plongent tous dans la même auge remplie d'eau acidulée. Le fig. 13, pl. I, représente la disposition des éléments de cette pile. La différence de conductibilité des métaux et des liquides fait que l'on perd peu à faire baigner

tous les éléments dans la même dissolution. Chaque lame de cuivre est séparée des lames de zinc par de petits morceaux de liège *m*, et l'on voit que, par sa disposition, un zinc est toujours placé entre deux cuivres et *vice versa*.

La disposition de cette pile permettant l'accumulation d'un très-grand nombre d'éléments, on peut obtenir des effets très-énergiques au moment où les couples plongent dans le liquide, mais l'action s'affaiblit rapidement.

Pile à mouvement de M. Ed. Becquerel. — Nous avons vu, page 33, que deux lames de même métal même inoxydable pouvaient constituer un couple voltaïque par leur immersion dans un liquide conducteur, pourvu que l'une d'elles fût en mouvement et l'autre en repos; M. Ed. Becquerel s'est imaginé d'appliquer ce principe aux piles à un liquide comme la pile de Smée pour en augmenter considérablement l'énergie. En mettant en effet en mouvement les électrodes négatives de chaque couple, on peut arriver à faire produire à ces piles un dégagement électrique au moins égal à celui qui est obtenu dans les piles à courant constant de même résistance.

Bien que M. Ed. Becquerel ne regarde pas ce nouveau système de pile comme susceptible d'application pratique, nous croyons que, dans certains cas, par exemple dans les usines où se trouvent des machines à vapeur et où l'on applique en même temps l'électricité, comme chez M. Cristofle, il pourrait être employé avantageusement, puisque le moteur ne coûte rien. Dans tous les cas, ce système mérite à tous égards de figurer parmi les perfectionnements de la pile.

Piles en chaînes. — Il est souvent nécessaire dans certaines applications de l'électricité, notamment dans les applications électro-médicales, d'avoir des piles portatives d'une très-grande tension, d'un très-petit volume, et susceptibles, par la mobilité de leurs éléments, de se prêter

à telle disposition qu'on veut leur donner. Dans ce but, M. Pulver-Macher s'est imaginé de donner à la pile la forme d'une véritable chaîne et d'en constituer les maillons par les éléments voltaïques eux-mêmes.

Pour parvenir à produire avec cette disposition des effets électriques énergiques, il fallait réunir plusieurs conditions assez difficiles à réaliser; il fallait d'abord que les couples présentassent assez de surface pour que l'électricité fût produite en quantité suffisante; en second lieu, il fallait que ces surfaces, tout en étant très-rapprochées l'une de l'autre, fussent suffisamment isolées et disposées de manière à retenir quelque temps entre-elles le liquide excitateur. Enfin il fallait, entre ces surfaces, l'interposition d'un corps solide isolant, pour leur solidité et le maintien assuré de leur disposition réciproque. M. Pulver-Macher a réalisé toutes ces conditions dans ses chaînes dont nous représentons ci-dessous deux spécimens.



Fig. 1.



Fig. 2.

Chaque élément se compose d'un petit morceau de bois mince légèrement bombé sur ses deux faces et sur lequel sont enroulés en hélice, l'un à côté de l'autre, un fil de zinc et un fil de cuivre. Ces fils sont en quelque sorte incrustés dans le bois, car la machine qui sert à les enrouler pra-

tique devant eux sur le bois une rainure assez profonde dans laquelle ils sont introduits et qui empêche leur déplacement. Pour augmenter la grandeur des surfaces métalliques appelées à exercer l'action électro-motrice, M. Pulver-Macher emploie quelquefois des fils *plats* placés de champ au lieu de fils cylindriques. On gagne, paraît-il, à cette disposition, un dégagement électrique d'autant plus considérable que le contact des surfaces métalliques avec l'air atmosphérique facilite le dégagement de l'hydrogène par la combinaison de celui-ci avec l'oxygène de l'air. De là résulte la *constance* relative des effets de cette pile.

Les figures 1 et 2 indiquent la manière dont peuvent être attachés ensemble les éléments qui doivent composer la pile. Quand leur nombre n'est pas considérable, ils sont accrochés les uns à la suite des autres, le fil zinc des éléments pairs se joignant avec le fil cuivre des éléments impairs. Mais quand ces éléments doivent être en grand nombre, on les joint parallèlement entre eux comme on le voit dans la fig. 2, et toujours de manière qu'un fil zinc soit uni à un fil cuivre.



Fig. 3.

Pour charger une chaîne électrique, il suffit de la plonger dans du vinaigre. Une fois imprégnée de liquide, elle peut conserver longtemps ses propriétés électriques.

Du reste la sensibilité de ces piles est telle que la moindre trace d'humidité suffit pour stimuler leur action électrique. C'est ce dont on peut se convaincre par la déviation de l'aiguille aimantée qui a lieu quand l'on serre entre le pouce et l'index un peu humecté, un maillon de cette chaîne enfermé dans le circuit d'un galvanomètre multiplicateur.

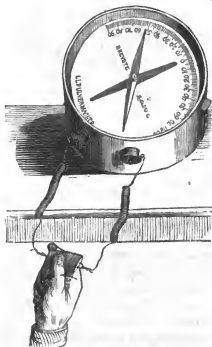


Fig. 4.

L'énergie des effets électriques produits par les chaînes

de M. Pulver-Macher dépend du nombre des éléments dont la chaîne est composée.

Une chaîne, de 25 éléments, même à l'état sec, fait diverger les feuilles d'or dans l'électroscope de Bohnenberg sans employer de condensateur.

Une chaîne de 30 à 40 éléments décompose immédiatement l'eau pure, en quantité proportionnelle bien entendu à la grosseur des maillons.

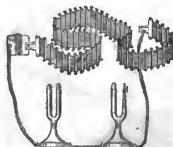


Fig. 5.

Une chaîne de 150 à 180 produit des étincelles électriques;

Une chaîne de 200 éléments, de dimensions plus grandes, allume la poudre à distance;

Une chaîne de 120 à 130 éléments, de grandeur ordinaire, cause une violente contraction des muscles au moment où le cercle est interrompu; quand il est fermé constamment (sans interruption), l'effet calorifique est assez fort pour cautériser la peau.

M. Pulver-Macher, qui a établi sur une grande échelle la fabrication de ces chaînes, les a accompagnées de nombreux accessoires pour leurs applications à la médecine; je n'en parlerai pas en ce moment; car ce serait sortir de l'objet

du présent chapitre ; mais je me réserve d'y revenir plus tard au sujet des applications électro-médicales.

Autres systèmes de chaînes galvaniques. — Les résultats avantageux qui ont été obtenus de l'application des chaînes électriques de M. Pulver-Macher ont à tel point surexcité la convoitise de certains pharmaciens, médecins et autres, que chacun a voulu avoir une chaîne galvanique de son invention. Il va sans dire que toutes ces espèces de chaînes reposent sur le même principe, et qu'elles ne varient que dans la forme ou la manière dont les éléments cuivre et zinc sont disposés les uns vis-à-vis des autres, mais, pour ces prétendus inventeurs, le point important était de se dire brevetés, et ils l'ont été. C'est ainsi qu'au bureau des brevets d'invention on trouve des chaînes et rubans galvaniques de MM. Wiese et Jurisch, de Couvents, de Dutter, de Basset, de Gaumont, de Goldberger, de String-Felow, etc., etc. Il est vrai, par exemple, que leur réputation n'est pas sortie des cartons du ministère de l'agriculture et du commerce.

Dans les unes, celles de M. String-Felow, chaque élément se compose d'une lame de zinc enveloppée dans une gaine trouée de cuivre et isolée de ce métal au moyen d'un corps fibreux isolant. Cette gaine de cuivre peut être constituée soit par de la gaze de cuivre, soit par des lames très-minces entaillées ou percées de trous.

Dans d'autres chaînes, les lames métalliques sont plus ou moins découpées, et fixées sur une bande de cuir. D'autres encore ont leurs chaînons composés de métaux différents et alternés dans le même ordre, mais, comme je l'ai dit, tous ces systèmes se rapportent plus ou moins à celui de M. Pulver-Macher, qui est resté le meilleur de tous.

Comme on le voit, les piles de Volta et de Wollaston, malgré la supériorité incontestable et incontestée des piles de Grove et de Daniell, n'ont pas été pour cela aban-

données et peuvent encore être employées avec avantage dans certains cas, et c'est pour cela que nous leur avons consacré un chapitre spécial.

Comme piles hydro-électriques, j'aurais bien encore à parler des piles à tasses, des piles à auges, des piles à hélices et des piles de Sturgen, d'Yong et de Schœnbein, mais comme elles sont très-connues, et d'ailleurs décrites dans la plupart des traités de physique, je les passerai sous silence, d'autant mieux qu'elles n'offrent plus maintenant qu'un intérêt historique.

Il y a bien aussi d'autres piles d'invention récente qu'on ne connaît guère que quand on consulte les dossiers des brevets d'invention. Ces piles, qui portent le nom de MM. Defonvielle, Canat, Leyris, Dehayé, etc., ne sont guère que des modifications plus ou moins heureuses ou malheureuses de celles que nous avons déjà décrites. L'une d'elles, dont le titre *pile pouvant fonctionner dans la mer*, semble attirer l'attention, est une conception tellement originale qu'on se demande si le but de l'inventeur, en l'imaginant, était de créer des usines flottantes d'électricité. Dans ce cas, il serait difficile d'admettre les moyens proposés pour cela comme économiques et réalisables.

PILES SÈCHES.

Nous avons dit qu'une pile ne pouvait fonctionner qu'au détriment d'un des métaux qui s'altérât peu à peu en présence du liquide intermédiaire. Quelque temps après la pile de Volta, on chercha à ne pas employer de liquides excitants; on n'atteignit pas complètement le but, mais on obtint des organes électriques particuliers auxquels on a donné le nom de piles sèches. MM. Hachette et Desormes remplacèrent d'abord le liquide dans les piles ordinaires par la colle d'amidon. Deluc, quelques années après, forma

une colonne composée de disques de zinc et de papier doré d'un côté seulement, entassés les uns sur les autres, le zinc en contact avec la face dorée. L'humidité du papier suffisait pour charger la pile. Zamboui, en 1812, construisit une pile du même genre, mais plus perfectionnée, qui produisit des effets tout à fait remarquables. Cette pile se composait de milliers de disques de papier dont une des faces était étamée et dont l'autre était recouverte d'une couche de peroxyde de manganèse broyé avec un mélange de farine et de lait. En entassant tous ces disques les uns sur les autres et les serrant fortement, on forme un cylindre de papier qui donne une charge électrique différente à ses deux extrémités, et cette électricité a une assez grande tension pour exercer des effets analogues à ceux de l'électricité statique. Un phénomène bizarre que présentent ces piles, c'est qu'elles cessent de fonctionner au bout d'un certain temps, pour redevenir actives quelques instants après. On a reconnu que ce phénomène résultait de la déperdition d'humidité du papier par suite de l'action électrique produite, et, pour éviter ces intermittences, on coule ordinairement du soufre autour de la pile, ne laissant à nu que les deux extrémités. Du reste, comme l'électricité fournie par ces piles est en très-petite quantité, les effets ordinaires des courants voltaïques sont très-faibles et même souvent inappréciables. C'est en raison de cela que ces piles n'ont servi jusqu'ici qu'à produire des mouvements continus au moyen de faibles attractions et répulsions qu'exercent les électricités accumulées aux deux pôles. On a aussi employé les piles sèches pour augmenter la sensibilité de l'électromètre condensateur. C'est là une de ses applications les plus utiles.

PILES A GAZ.

Pile à gaz de M. Grove. — M. Grove a eu l'idée de réunir en pile des couples formés par des lames de platine plongées mi-partie dans de l'oxygène et de l'hydrogène, mi-partie dans un liquide conducteur. Il a obtenu ainsi ce qu'il a appelé la *pile à gaz*, dans laquelle il n'entre qu'un seul liquide et un seul métal, et où l'action électrique résulte des actions exercées par les lames auxquelles adhèrent l'hydrogène et l'oxygène.

Chaque élément de cette pile se compose de deux tubes de verre renfermant chacun une longue lame de platine et fermés à l'une de leurs extrémités par une douille de cuivre, à laquelle est soudée la lame de platine. L'un de ces tubes est rempli de gaz oxygène, l'autre de gaz hydrogène, et ils plongent tous les deux dans un vase rempli d'eau acidulée, de manière à ce que les lames de platine soient immergées par leur extrémité inférieure.

Dans un couple ainsi disposé, le pôle positif est formé par la lame de platine plongeant dans l'oxygène, et le pôle négatif correspond à l'autre lame.

D'après M. Becquerel, la cause de la provocation d'électricité dans la pile à gaz doit être rapportée à la combinaison lente des gaz, dissous dans le liquide sous l'influence des lames de platine. En effet, quand on décompose l'eau dans un voltamètre à l'aide d'une batterie à gaz, à mesure que les volumes des gaz provenant de la décomposition de l'eau augmentent dans le voltamètre, les volumes de l'oxygène et de l'hydrogène de chaque couple à gaz diminuent dans la même proportion; cet effet montre que dans chaque couple il se forme de nouveau autant d'eau qu'il y en a eu de décomposée dans le voltamètre.

Pile hydrodynamique du docteur Carosio, de Gènes. — J'ai réservé, pour la fin de ce chapitre, sur les piles, la fameuse pile hydrodynamique du docteur Carosio, à laquelle sont venus se brûler bon nombre de moutons de Panurge, que nous avons bien peur de voir prochainement cruellement déçus.

Comme notre rôle, à nous, est d'être, avant tout, les historiens fidèles des découvertes électriques susceptibles d'application, nous ne devons rien omettre, et c'est pourquoi nous pourrions faire figurer dans cet ouvrage quelques inventions dont nous ne voudrions pas garantir la perfection. Mais le public auquel nous nous adressons pourra facilement distinguer ces dernières. On ne devra donc pas s'étonner si nous consacrons ici quelques pages à une découverte qui, au dire du *Cosmos*, ne s'est présentée, jusqu'à présent, que sous la forme de mystification, et qui est une sorte de réminiscence du mouvement perpétuel.

Quoi qu'il en soit, nous allons rapporter ce qui a été publié à ce sujet dans le *Moniteur*; car nous serions fâchés de déflorir, en y touchant, les magnifiques espérances qu'on annonce si haut, et que des gens prudents n'avoueraient que bien bas, si toutefois ils pouvaient les concevoir.

Un Génois, dit le *Moniteur*, dont le nom semble destiné à représenter une nouvelle gloire italienne, le docteur Augustin Carosio, vient de faire une invention qui sera, par elle-même, toute une révolution dans le monde scientifique et industriel.

Il s'agit tout bonnement de détrôner la vapeur par l'application de la *pile hydrodynamique*, qui, d'après l'idée de M. Carosio, produit indéfiniment la force motrice.

Voici en quoi consiste cette invention :

Comme tous les grands principes, la découverte dont nous parlons est simple en apparence.

L'appareil électro-magnétique, que M. Carosio a appelé

pile hydrodynamique, est basé sur la théorie des équivalents électro-chimiques, et sur la loi dite de Faraday, savoir : que le courant électrique est en raison directe de l'action chimique, et, par conséquent, que la quantité d'électricité qui sert à décomposer un gramme d'eau dans ses deux éléments, gaz oxygène et gaz hydrogène, est égale à celle qui résulte de la combinaison de ces deux mêmes gaz, quand ils s'unissent pour former un gramme d'eau. La preuve évidente et incontestable de cette théorie est la pile à gaz de M. Grove, dans laquelle la quantité de gaz qui sert pour recomposer l'eau est exactement égale à celle qui se forme par la décomposition de l'eau elle-même ; M. Pouillet est tellement de cet avis, qu'il l'a démontré de la manière la plus claire dans ses *Éléments de physique expérimentale et de météorologie*. (6^e éd., Paris, 1853.)

Appuyé sur ces faits, voici comment M. Carosio s'exprime dans la demande des brevets qu'il a obtenus en France, en Angleterre, dans les États-Unis de l'Amérique et dans presque tous les États de l'Europe :

« D'après ces principes, je me suis appliqué à former un ensemble d'appareils auxquels j'ai donné le nom de *pile hydrodynamique*.

« Ces appareils se composent :

« 1^o D'une batterie électrique formée de plusieurs cellules sur le principe de celle connue sous le nom de *pile à gaz de Grove*, où se produit le courant électrique ;

« 2^o D'une série de cellules où l'eau se décompose et produit les gaz oxygène et hydrogène ;

« 3^o De deux réservoirs où les deux gaz s'accumulent sous une pression de plusieurs atmosphères ;

« 4^o De deux cylindres où le mouvement est produit par la force élastique des deux gaz ;

« 5^o De deux autres réservoirs où les gaz, après avoir produit le mouvement, sont reconduits de nouveau, pour être

distribués ensuite dans les cellules de la batterie, et produire le courant électrique ;

« De plusieurs autres appareils secondaires qui servent à l'équilibre de la pression des gaz, à la distribution de l'eau acidulée, et aux autres fonctions de la machine.

« A l'aide de ces appareils j'obtiens :

« 1° La formation de l'eau par la combinaison du gaz oxygène et du gaz hydrogène ;

« 2° Un courant électrique toujours en proportion de ladite combinaison ;

« 3° La décomposition de l'eau en gaz oxygène et hydrogène proportionnelle au courant électrique, et égale à la quantité d'eau recomposée ;

« 4° J'obtiens la séparation des gaz à l'endroit même où ils se développent ; je les fais passer dans deux réservoirs où ils sont retenus sous la pression d'un nombre donné d'atmosphères, et, par l'augmentation de leur élasticité, je produis le mouvement en me servant d'un mécanisme semblable à celui des machines à vapeur ordinaires ;

« 5° Enfin, après avoir obtenu l'effet mécanique, je reconduis les deux gaz séparément dans l'appareil où a lieu la recombinaison de l'eau, pour répéter la même série de phénomènes, savoir : le courant électrique, la décomposition de l'eau et le mouvement.

« Si je le crois à propos, je puis diriger le courant électrique de manière à obtenir aussi le mouvement d'un appareil électro-magnétique sur le principe de celui de M. Jacobi, que je fais servir, soit conjointement à l'élasticité des gaz, soit séparément, à la production du mouvement des machines. »

Pour mieux comprendre le principe et l'application de cette admirable invention, il faudrait mettre ici sous les yeux du lecteur la description complète du dessin dont l'appareil est composé. Mais nous nous bornerons, pour

l'abrégé, à citer textuellement les propres expressions par lesquelles M. Carosio finit la demande qu'il a adressée au gouvernement français pour obtenir son brevet :

« Ayant donné l'explication de la nature de mon invention, et de la manière de l'appliquer, je désire qu'il soit parfaitement entendu que je ne me limite pas à la forme et aux dimensions de l'appareil que je viens de décrire, et qui est représenté dans le dessin annexé, ni à l'usage des matériaux que j'ai dit pouvoir être employés dans la construction des appareils, parce que tout cela peut être varié dans la forme et dans la matière, pourvu que le caractère particulier de mon invention soit maintenu complètement. »

M. Siemens, ingénieur prussien très-distingué, membre de l'Académie des ingénieurs civils de Londres et de plusieurs autres, connu par de nombreux travaux autant que par ses découvertes en physique et en mécanique, s'étant chargé d'activer l'invention Carosio, a fait à cet égard un rapport dans lequel il s'exprime en ces termes :

« Il ne sera peut-être pas considéré comme superflu de terminer ces remarques par un aperçu sur la *rationalité générale* de l'invention Carosio, suivant les vues du soussigné.

« Au premier abord le principe semblerait prétendre à un *mouvement perpétuel* qui sera toujours impossible à réaliser, parce qu'il donnerait à la matière un pouvoir créateur, ce qui est en contradiction avec la philosophie rationnelle.

« Dans ces dernières années, il a été prouvé, par les recherches de MM. Clapeyron, Holzmann, Mayer, Joule, Grove, Thompson et d'autres, que la chaleur, l'électricité, la lumière, le son, l'affinité chimique et la force dynamique ne sont que les différentes manifestations d'une grande cause universelle, le mouvement.

« Ces philosophes ont même réussi à établir un rapport numérique entre plusieurs de ces forces, et principa-

lement entre la chaleur, l'électricité et la force dynamique.

« Cette théorie, que l'on peut appeler la théorie dynamique, dit que, pour obtenir un effet mécanique, une certaine quantité d'électricité ou de chaleur ou d'autre manifestation du mouvement doit être sacrifiée.

« Dans toutes les machines électro-magnétiques, l'électricité est dépensée; et, comme elle est produite à un prix beaucoup plus fort que la chaleur par la combustion, il s'ensuit naturellement que ces machines doivent être plus chères pour l'entretien qu'une machine à vapeur ou toute autre machine calorique.

« Le même argument s'applique contre la production de la lumière ou de la chaleur par l'électricité; peu importe que la transformation soit directe (par l'ignition d'un conducteur imparfait), ou indirecte (par la décomposition de l'eau et de la combustion du gaz hydro-oxygène).

« Mais dans la machine Carosio, le courant électrique est employé comme un agent suppléatoire pour transporter les gaz d'un récipient à l'autre. Ces gaz, dans leur expansion derrière le piston de la pompe, perdent leur chaleur précisément dans la même proportion dynamique de l'effet obtenu. Cette chaleur doit être complètement redonnée aux gaz avant qu'ils entrent dans l'appareil recompositeur.

« En d'autres termes, la machine Carosio est essentiellement une machine calorique, avec cet important avantage sur les autres, que les gaz étant permanents peuvent être employés à une température au-dessus de celle des corps environnants, savoir, l'air ou l'eau, qui peuvent être, en conséquence, un médium pour céder une portion de leur chaleur, tandis que, pour des machines qui opèrent à une température élevée, cette chaleur doit être produite artificiellement.

« La seule force électrique dépensée dans ce cas est celle de la résistance des médiums conducteurs du courant; ce

qui, même sous les plus favorables circonstances, rend nécessaire un supplément continuél de gaz d'une source étrangère pour maintenir la quantité.

« La réalisation finale du principe contenu dans l'invention Carosio semble au soussigné une chose certaine. »

Dans un autre rapport postérieur, M. Siemens dit : « Que maintenant il lui semble bien possible de construire un appareil de composition et de décomposition d'une puissance considérable, sans s'exposer à une dépense inutile et préjudiciable aux intérêts des associés. »

Il y a déjà 15 ans que M. Carosio s'occupe de sa merveilleuse invention. Cela est tellement vrai, qu'en 1840, M. le marquis de Brignole-Sales, à cette époque ministre de Sardaigne à Paris, présenta à M. Arago, alors secrétaire de l'Académie des Sciences, un exposé fait par M. Carosio lui-même, comme il résulte du compte rendu des séances de ladite académie du 2 mai 1853. Toutefois des difficultés imprévues, qui toujours semblent devoir naître sur les pas des inventeurs, des obstacles multiples que l'on voit à l'origine de toute grande création surgir inévitablement comme pour servir d'épreuves au génie et mesurer la force de son œuvre, avaient malheureusement trop longtemps retardé les expérimentations décisives de la découverte Carosio.

Mais le patriotisme des Génois ne tarda pas à venir en aide aux efforts persévérants de leur compatriote. L'année dernière, une société anonyme, approuvée par un décret spécial du roi de Sardaigne, se forma, comme par enchantement, à Gênes, et l'on parvint à réunir, en très-peu de temps, la somme de 2 millions de francs pour l'application pratique de cette heureuse découverte. Ce fut alors que M. Carosio, précédé d'une recommandation officielle du gouvernement sarde pour tous ses agents à l'étranger, se hâta de partir pour Londres, afin de soumettre à des méca-

niciens et à des ingénieurs expérimentés l'exécution de sa machine.

C'est ainsi qu'après une année d'expériences les plus heureuses, une première machine, construite pour le compte de la société de Gênes, sous les ordres de l'ingénieur Siemens, sera en état de fonctionner à Londres avant la saison d'hiver.

Chose admirable! cette machine ne consume que ce qu'elle produit par sa propre force, et cette force, par opposition à celle de la vapeur, n'est pas limitée par la limitation des résistances; enfin elle n'entraîne ni les frais ni les dangers du combustible.

L'application de la *pile hydrodynamique* à la locomotion navale donnera à son inventeur le droit de pouvoir dire avec un juste orgueil: « Si mon compatriote Colomb a découvert l'Amérique, j'ai découvert le véritable moyen de la rapprocher de l'Europe. »

M. Carosio a chargé MM. Deleuil père et fils de la construction de cette pile. Voici ce qu'en dit le *Cosmos* dans son numéro du 16 février 1855: MM. Deleuil père et fils nous ont invité à venir voir dans leurs ateliers l'appareil qu'ils ont construit pour la mise à exécution de l'idée fantastique du docteur Carosio, qui prétend transformer la pile à gaz de Grove en source féconde et économique de force motrice. Cet appareil vraiment extraordinaire est très-habilement construit sur les plans de l'auteur. Ce sont deux grands cylindres formant l'un la pile, l'autre le voltamètre. Les parois du premier cylindre sont en gutta-percha parfaitement moulée; il est divisé en deux compartiments par une cloison en terre poreuse; le long de chaque compartiment règne un cylindre de charbon tourné au tour et auquel sont appendues 120 plaques rectangulaires aussi en charbon, constituant les éléments positifs de la pile à gaz. Cette pile compte donc deux fois 120 ou 240 élé-

ments. Le cylindre enveloppé sera rempli à moitié d'eau acidulée par de l'acide sulfurique, puis d'un côté avec de l'oxygène, de l'autre avec de l'hydrogène. Le voltamètre a ses parois en verre; il est partagé aussi en deux compartiments par un diaphragme en porcelaine poreuse, et dans la longueur de chacun des compartiments règnent trois tubes recouverts de feuilles de platine. Les feuilles de platine d'un des compartiments communiquent avec le pôle négatif, les feuilles de l'autre compartiment communiquent avec le pôle positif: le premier compartiment sera rempli moitié d'eau acidulée, moitié de gaz oxygène; le second, moitié d'eau acidulée, moitié de gaz hydrogène. Quand la pile sera armée comme nous l'avons dit, *elle devra engendrer à son tour des torrents de gaz; ces torrents de gaz devront enfin soulever les pistons énormes d'une toute-puissante machine! Parturient montes!*

Les expériences finales, qui ont été faites depuis la publication de ces deux articles, ont prouvé que, comme nous l'avions avancé il y a un an, l'idée de M. Carosio n'était qu'une de ces chimères qui ont enivré, hélas! tant de personnes, et qui en enivreront encore bien d'autres. Du reste, M. Carosio a trouvé dans son propre pays un rival. M. Frascara, en effet, s'est imaginé de résoudre le même problème par les mêmes moyens, et il est également breveté!

GÉNÉRATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

Si l'on considère que la plupart des phénomènes physiques ou chimiques, qui se manifestent à la surface du globe, ont pour résultat un dégagement d'électricité, et que cette électricité se trouve perdue parce que les éléments sur lesquels elle se développe ne sont pas isolés les uns des autres, on arrive à cette conclusion: qu'en prenant des dispositions

convenables, on pourrait créer, sans dépense, des foyers d'électricité qu'on pourrait utiliser de mille manières. La vapeur qui soulève les pistons des machines, la pluie qui tombe sur les toits, le charbon qui brûle dans les foyers, les émanations qui se dégagent des fabriques, toutes les réactions qui se produisent dans la fabrication des substances chimiques, le frottement exercé par les chutes d'eau ou les corps solides entre eux, etc., etc., sont autant de causes productrices de l'électricité. M. Chenot, dans un très-intéressant mémoire qui accompagne la description du brevet qu'il a pris pour son électro-mètreur et son électro-trieur, entre dans de nombreux détails sur les procédés à employer pour obtenir la manifestation des électricités ainsi développées. Je n'entrerai dans aucuns détails à cet égard, car je m'écarterais du but que je me suis proposé. Je renverrai donc les amateurs que cette question intéresse au brevet de M. Chenot.

REMARQUES GÉNÉRALES SUR LES PILES.

Polarité des éléments sur lesquels se développe l'électricité dans les piles, suivant qu'on les considère par rapport au circuit ou par rapport à la pile. — Jusqu'à présent nous avons désigné sous le nom d'élément positif d'un couple celui qui fournit le pôle positif, et d'élément négatif celui qui fournit l'électricité négative. Toutefois il est important de bien s'expliquer à cet égard, car ces éléments ne jouent pas par rapport à la pile le même rôle qu'ils jouent par rapport au circuit. Pour bien fixer les idées, considérons l'élément de Grove. Dans ce couple, la lame de platine fournit, comme nous le savons, l'électricité positive; mais pour pouvoir être chargée d'électricité positive il a fallu que toute son électricité négative ait été absorbée, et cette absorption a été la conséquence du dégagement de l'hydrogène à la

suite de la décomposition de l'eau acidulée. Le platine et l'acide dans lequel ce métal plonge sont donc, par rapport à la pile, l'élément électro-négatif, et constituent, pris collectivement, la *case négative* de l'élément.

Au contraire, l'oxygène de l'eau décomposée en absorbant l'électricité positive du zinc fait de celui-ci l'élément positif de la pile.

Ces distinctions sont importantes, car elles montrent que le courant en traversant les liquides de la pile suit la même direction que dans le circuit extérieur, et ne se bifurque pas, comme plusieurs personnes l'ont cru. Il en résulte que l'action électrolytique due au passage du courant à travers ces liquides réagit alors dans le même sens que l'action chimique, et la renforce considérablement. C'est pourquoi l'action chimique exercée dans les piles est infiniment plus énergique quand le circuit est fermé que quand il est ouvert. C'est pourquoi encore les éléments d'une pile composée de plusieurs couples réunis en tension s'usent relativement beaucoup plus vite que quand ces éléments agissent individuellement; car chaque élément est traversé par tous les courants individuels de tous les autres éléments et le sien propre, et pour chacun de ces courants se manifeste une action électrolytique qui a pour effet de décomposer l'eau acidulée de chaque couple et d'oxyder les zincs.

Polarisation électrique. — Nous avons vu comment les bulles d'hydrogène en s'attachant aux lames polaires des piles voltaïques empêchaient l'action chimique de s'effectuer, et offraient une grande résistance au courant qui en résultait. Cet état des lames est ce que l'on est convenu d'appeler leur *polarisation*. Nous avons vu également comment on était parvenu, par des combinaisons chimiques, comme dans les piles à deux liquides, à empêcher ce dépôt, mais nous n'avons pas encore parlé du phénomène secondaire que produit cette polarisation. Ces effets sont pour-

tant assez puissants pour qu'on ait pu créer des piles à courants secondaires décomposant l'eau, fournissant des étincelles, réagissant sur l'électromètre, et fournissant même des commotions assez fortes.

Lorsque deux lames d'un métal homogène non oxydable, tel que le platine et l'or, sont mises en communication chacune avec l'un des pôles d'une pile, et plongent dans un liquide conducteur capable d'être décomposé par le courant, elles acquièrent des propriétés telles qu'elles sont aptes à produire un courant dirigé en sens inverse du premier quand la pile est enlevée et qu'on ferme de nouveau le circuit. Cette propriété singulière, qui tend sans cesse à affaiblir l'action du courant primitif, est assez forte pour qu'on ait pu, comme je l'ai dit, composer des piles à courants secondaires.

Selon M. Becquerel, cette propriété serait due au dépôt sur les lames décomposantes des gaz et autres corps transportés par le courant, et ces corps en réagissant sur le liquide ambiant donneraient lieu à ce courant secondaire qui se manifeste en sens inverse de celui qui a polarisé les lames.

Dans les couples voltaïques dont les éléments polaires ne sont pas dépolarisés, ces effets secondaires peuvent réagir et masquer quelquefois les résultats que l'on veut obtenir. On comprend donc par là l'importance de la dépolarisation.

Dépolarisation par l'air atmosphérique. — L'oxygène de l'air, comme nous l'avons dit au sujet des piles en chaîne, peut agir comme organe dépolarisateur dans les couples voltaïques; mais il faut pour cela que la force électromotrice de ces piles soit peu considérable, et que les éléments polaires présentent un grand nombre de points en contact avec l'air atmosphérique. Ce n'est donc que dans les piles en chaînes et dans les piles de Volta que ce mode de dépolarisation est suffisant.

APPAREILS DÉPOLARISATEURS.

Afin de rendre rigoureusement constants les courants hydro-électriques, M. Becquerel a imaginé des appareils auxquels il a donné le nom de dépolarisateurs, et dont l'effet est de dépolariser continuellement deux lames de platine en communication avec la source électrique, et destinées à réagir sur la dissolution que l'on veut soumettre à l'action électrique.

L'un des systèmes de ces appareils est formé d'un vase en verre cylindrique renfermant un liquide et dont le bord supérieur est recouvert d'une garniture métallique interrompue en deux points. Chacune des moitiés est mise en communication avec l'un des éléments d'un couple à force constante. Sur la garniture viennent s'appliquer avec pression les deux extrémités d'une traverse horizontale mobile en laiton, destinée à prendre les électricités de la source. La traverse est interrompue sur une longueur d'un centimètre, par une tige d'ivoire servant d'isolant. A chacune des branches de la traverse est fixée une lame de platine qui vient plonger dans le liquide du vase. De chacune de ces mêmes branches part une lame de cuivre formant ressort, qui vient s'appliquer sur un interrupteur cylindrique mobile placé au-dessus et mis en rapport avec une boussole des sinus ou un multiplicateur. On imprime à tout le système un mouvement de rotation au moyen d'un engrenage et d'un moteur électro-magnétique. A l'aide du double interrupteur, les deux lames de platine étant sans cesse dépolarisées, et la même espèce d'électricité entrant toujours par le même bout du fil formant le circuit de la boussole ou du multiplicateur, le courant est constant.

Le second appareil est d'une application beaucoup plus étendue : il est pourvu également de deux interrupteurs,

mais il est construit de telle sorte, que les deux lames de platine se trouvent chacune dans un vase séparé, renfermant le même liquide, ou un liquide différent. Ces lames peuvent, au moyen d'un mécanisme particulier, passer d'un vase dans l'autre, où elles se dépolarisent. Entre les deux vases se trouve un support en verre où l'on place les deux liquides qui doivent réagir l'un sur l'autre, et qui sont en relation avec les liquides des vases, au moyen de mèches de coton imbibées d'eau. Avec ces dispositions, le courant électrique résultant de la réaction chimique est constant. (Voir l'ouvrage de M. Becquerel, 1^{er} vol., p. 190.)

II.

DES CIRCUITS ET DES COURANTS.

Propagation du fluide électrique dans les circuits voltaïques. — La manière dont se propage le fluide électrique à travers un circuit voltaïque est une des questions les plus délicates de la physique et qui peut être envisagée d'une manière différente suivant que la manifestation électrique est considérée comme un mouvement vibratoire ou comme une émanation de fluides. Sans préjuger en aucune façon en faveur de l'une ou de l'autre hypothèse, mais en cherchant seulement à rapporter cet ordre de phénomènes à ceux de l'électricité statique, on peut cependant se faire une idée plus précise du phénomène.

En effet, pourquoi les conducteurs de la machine électrique se trouvent-ils chargés de l'électricité développée sur le plateau de verre? C'est parce que celle-ci sépare par influence les électricités de ces conducteurs, repousse l'électricité de même nom à leur extrémité la plus éloignée, et attire celle de nom contraire qui, en s'écoulant par les

pointes des mâchoires, se trouve neutralisée. Quand on réunit les deux armures d'une bouteille de Leyde pour la décharger, que fait-on? On oppose à une électricité déjà développée un corps conducteur en rapport avec l'électricité contraire également développée; or, l'influence exercée par la première armure sur ce conducteur est d'autant plus activée, que l'électricité attirée est précisément en provision dans la seconde armure et, par suite, dans le conducteur qui, par son contact avec elle, se trouve en faire partie.

Une pile, d'après ce que nous avons dit, ne diffère d'une bouteille de Leyde que par la tension des fluides développés. Mais, pour avoir moins de tension, le phénomène de la conductibilité n'en doit pas être pour cela différent. Il faut donc admettre que le conducteur attaché à un pôle de la pile joue le même rôle que celui qui est en contact avec l'une des armures de la bouteille de Leyde et contribue, aussi bien que la surface conductrice polaire immergée, à la neutralisation provoquée par la réaction chimique. En conséquence, il doit se trouver chargé de la même électricité que celle qui se serait dégagée sur l'appendice polaire correspondant.

Quand le conducteur n'a qu'une longueur très-limitée, on conçoit que l'aspiration électrique puisse avoir directement action sur les différentes molécules qui le composent; mais, quand sa longueur devient considérable, cette hypothèse ne peut plus être admise: comment donc s'opère alors l'aspiration électrique provoquée aux pôles de la pile?

Pour peu qu'on examine attentivement la question, on ne tarde pas à se convaincre que, si on représente par la lettre A la quantité des molécules du conducteur qui ont fourni leur électricité à la première aspiration électrique, cette quantité A devra emprunter aux molécules voisines la quantité d'électricité qui lui a été enlevée. Mais, au lieu

de se combiner avec l'électricité restante, cette quantité empruntée se trouvera aussitôt attirée par l'aspiration polaire qui est incessante, de sorte que toute l'électricité du conducteur qui satisfait à la réaction chimique se trouve bientôt absorbée, et le conducteur est, par suite, chargé de l'électricité contraire.

D'après ce mode de transmission qui appartient aussi bien à l'électricité des machines qu'à l'électricité de la pile, il doit s'ensuivre que, plus le conducteur sera long, plus la force électrique diminuera; car les aspirations électriques successives doivent perdre de plus en plus de leur force et la matière elle-même n'est pas sans fournir de résistance au mouvement des électricités. Mais, si la force électrique diminue ainsi avec la longueur du conducteur sur lequel elle est développée, elle doit augmenter avec la grosseur de ces conducteurs, puisque la quantité des molécules impressionnées à la fois est plus considérable. Toutefois, remarquons que l'augmentation de la force électrique, dans ce cas, n'a lieu que sous un seul rapport, celui de la *quantité d'électricité* passant dans le conducteur dans un moment donné; sous le rapport de l'énergie de l'aspiration, c'est-à-dire sous celui qui lui permettrait de réagir sur un conducteur d'une grande longueur, cette force électrique n'a pas changé de valeur, car la tension de la force électrique initiale n'a pas augmenté.

☞ *Expériences de M. Wheatstone.* — Si l'on considère que les circuits que l'on a ordinairement à sa disposition sont extrêmement courts et mal isolés, on comprendra facilement que la vérification des lois de propagation et de distribution du fluide électrique dans les circuits était impossible. Pour que cette question pût être résolue d'une manière tout à fait incontestable, il fallait opérer sur un fil de plusieurs myriamètres de longueur et isolé avec de la gutta-percha. Or les câbles des lignes télégraphiques sous-

marines que l'on construit actuellement en Angleterre pouvaient seuls fournir ces éléments d'expérimentation. C'est ce à quoi pensèrent MM. Wheatstone et Faraday, et avant que ces câbles ne fussent envoyés à leur destination, ils demandèrent qu'on les mit pendant quelque temps à leur disposition, ce qui leur fut accordé avec empressement.

Le câble avec lequel M. Wheatstone fit ses expériences était celui qui devait unir la Spezia sur les côtes du Piémont avec l'île de Corse. Il était long de 177 kilomètres, et contenait 6 fils de cuivre d'un millimètre $1/2$ de diamètre, isolés individuellement et recouverts chacun d'une couche de gutta-percha de 2 millimètres d'épaisseur. L'ensemble du câble était entouré de 12 fils de fer épais roulés en spirale de manière à former une enveloppe métallique d'un tiers de pouce (8 millimètres) d'épaisseur. La section transversale du câble montrait les 6 fils disposés sur un cercle de 25 millimètres de diamètre, et placés à 5 millimètres de la surface intérieure de l'enveloppe en fer. Le câble était enroulé dans un puits desséché de la cour avec ses deux extrémités accessibles, l'une d'elles avait été amenée jusque dans l'atelier. Les premiers bouts des fils dans l'atelier étaient numérotés 1, 2, 3, 4, 5, 6; les bouts à l'orifice du puits étaient marqués 1', 2', 3', 4', 5', 6'; on pouvait, par des fils supplémentaires, établir les communications suivantes 1' 2, 2' 3, 3' 4, 4' 5, 5' 6; de manière à ne faire de tous les fils qu'un fil unique long de 1062 kilomètres, 266 lieues, à travers lequel le courant électrique pouvait circuler dans la même direction. L'électromoteur qui fournissait le courant était une pile isolée, formée de douze auges renfermant chacune 12 éléments de Wheatstone, et qui a fonctionné pendant plusieurs semaines.

Première expérience. Une des extrémités du circuit entier formé de la réunion des 6 fils et long de 1062 kilomètres, a été mise en communication avec l'un des pôles

de la pile, dont l'autre pôle communiquait avec la terre, tandis que la seconde extrémité du long circuit restait isolée. Le fil alors se chargeait d'électricité négative, quand son extrémité touchait le pôle zinc, d'électricité positive quand cette extrémité touchait le pôle cuivre. Un galvanomètre placé près de la pile indiquait la présence d'un courant aussi longtemps que la charge allait en augmentant; dès qu'elle avait atteint son maximum, ce courant cessait. (On ne tenait pas compte d'un autre courant très-faible provenant de ce que l'isolement des fils n'était pas parfait, et qui durait aussi longtemps que le fil était en contact avec la pile.) Lorsque le fil étant chargé, on le déchargeait en mettant l'extrémité isolée en communication avec la terre par un fil conducteur, le courant produit avait constamment la même direction, soit que la décharge eût lieu par l'extrémité voisine de la pile, soit qu'elle eût lieu par l'extrémité opposée; c'est-à-dire que dans les deux cas le courant allait du fil à la terre dans la même direction.

Deuxième expérience. On mettait une des extrémités du fil en contact avec un des pôles de la pile, sans faire communiquer le second pôle de la pile avec la terre, le fil alors ne se chargeait pas d'électricité; on n'observait sur l'aiguille du galvanomètre interposé entre la pile et le fil qu'un tremblement léger et à peine perceptible.

Troisième expérience. On prenait sur le fil entier deux longueurs de 177 kilomètres chacune, on laissait isolée une des extrémités de chacun de ces circuits partiels, on reliait leurs deux autres extrémités aux deux pôles de la pile; et de chaque côté, entre le fil et la pile, on interposait un galvanomètre : chacun des pôles de la pile était ainsi armé d'un conducteur de 177 kilomètres, isolé à l'extrémité, qui ne communiquait pas avec la pile. Aussi longtemps qu'un seul des pôles de la pile était armé de son

long conducteur, ce conducteur ne se chargeait pas d'électricité; mais aussitôt que les deux pôles étaient armés de leurs conducteurs, les deux conducteurs se chargeaient instantanément d'électricité; et la forte déviation des aiguilles accusait la présence d'un courant intense. Si l'on faisait communiquer l'extrémité libre de l'un des fils avec la terre, ce fil était déchargé seul, l'autre fil restait pleinement chargé.

SECONDE SÉRIE D'EXPÉRIENCES. *Quatrième expérience.* Un des pôles de la pile communiquait avec la terre; l'autre avec l'un des bouts du fil de 1062 kilomètres, dont l'autre bout communiquait aussi avec la terre; on interposait trois galvanomètres dans le circuit; le premier près de la pile; le second au milieu du fil, c'est-à-dire à 531 kilomètres de chaque extrémité; le troisième, enfin, à l'extrémité opposée du fil, près de sa communication avec la terre. Si on fermait le circuit en établissant le contact de la pile avec le fil, après que l'autre extrémité du fil avait été reliée à la terre, les aiguilles des trois galvanomètres étaient déviées, mais déviées successivement, dans l'ordre de la distance à la pile, comme dans les expériences de M. Faraday. Si, au contraire, on fermait le circuit en mettant le second bout du long conducteur en communication avec la terre, après que le premier bout avait été amené en contact avec le pôle de la pile, la rupture d'équilibre commençait à ce second bout, et les aiguilles des galvanomètres étaient successivement déviées dans l'ordre opposé, c'est-à-dire que l'aiguille du galvanomètre le plus distant de la pile était mise la première en mouvement. Dans ce dernier cas, avant que le circuit ne fût fermé, les aiguilles du galvanomètre déviaient d'une quantité limitée sous l'action d'un courant faible, né de la dispersion uniforme le long du fil de l'électricité statique.

Cinquième expérience. Les deux extrémités du conduc-

teur de 1062 kilomètres étaient mises en communication avec les pôles opposés de la pile. Au moment où, pour fermer le circuit, on amenait l'un des bouts du fil en contact avec le pôle correspondant de la pile, l'autre bout communiquant déjà avec le second pôle, les aiguilles des deux galvanomètres placés aux deux extrémités du circuit, à égale distance des pôles, étaient immédiatement et simultanément déviées; ce n'était que plus tard que l'aiguille du galvanomètre, placé au milieu du circuit, était déviée à son tour. Lorsque, au contraire, on fermait le circuit, non plus à l'une des extrémités voisines de la pile, mais au milieu, en réunissant les deux moitiés momentanément séparées, l'aiguille du galvanomètre du milieu, le plus distant des pôles, était déviée la première, celles des galvanomètres voisins des pôles n'étaient déviées que plus tard.

TROISIÈME SÉRIE. *Sixième expérience.* Un des pôles de la pile communiquait avec la terre, et le pôle opposé avec l'une des extrémités du fil de 1062 kilomètres, l'autre extrémité de ce fil restant isolée; un galvanomètre sensible fut introduit dans le circuit près de la pile. Quoique le circuit ne fût pas fermé, l'aiguille subissait une déviation constante de $33^{\circ} 1/2$; le faible courant mis ainsi en évidence doit être moins attribué au défaut d'isolement qu'à la dispersion uniforme et continuelle de l'électricité statique, dont le fil est chargé sur toute sa longueur, ainsi que le serait un autre corps conducteur quelconque placé dans un milieu isolant. L'intensité du courant ainsi produit a paru approximativement, sinon exactement, proportionnelle à la longueur du fil ajouté au pôle de la pile. On avait, en effet, pour 0 de fil ajouté, 0° de déviation; pour 177 kilomètres $6^{\circ} 1/2$ de déviation; pour 354 kilom. 12° ; pour 531 kilom. 18° ; pour 708 kilom. $23^{\circ} 1/2$; pour 885 kilom. 28° ; pour 1062 kilom. 31° .

Septième expérience. Un des bouts du fil de 1062 kilomètres restait constamment en contact avec un des pôles de la pile; mais le galvanomètre était successivement placé à diverses distances de ce même pôle; l'autre bout du fil était encore isolé. L'intensité du courant semblait être alors en raison inverse de la distance du galvanomètre à la pile, et devenait nulle à son extrémité. On avait, en effet, très-près de la pile, une déviation de $33^{\circ} 4\frac{1}{2}$; à 177 kilom., 31° ; à 354 kilom., 25° , à 531 kilom., 15° ; à 703 kilom., 12° ; à 885 kilom., 5° ; à 1062 kilom., 0° . Aussi longtemps que les déviations de l'aiguille du galvanomètre employé ne surpassaient pas 36° , on pouvait les regarder comme sensiblement proportionnelles à l'intensité du courant. M. Wheatstone s'en est assuré de la manière suivante : il a pris six éléments de la petite pile constante, et dans le circuit formé des 1062 kilomètres de fil, de la terre et du galvanomètre, il a introduit successivement 1, 2, 3, 4, 5 et 6 éléments. En ne tenant pas compte de la résistance au sein des éléments et de la résistance au sein de la terre, très-petites toutes deux, en comparaison de la résistance opposée par le long fil, la force du courant devait être sensiblement proportionnelle au nombre des éléments; or, les déviations des aiguilles accusaient approximativement cette même proportionnalité, comme le prouvent les chiffres suivants : 1 élément, déviation, 6° ; 2 éléments, 14° ; 3 éléments, 19° ; 4 éléments, 28° ; 5 éléments, 32° ; 6 éléments, 36° ; il faut donc nécessairement admettre que l'intensité du courant, tant que la déviation ne dépasse pas 36° , correspond sensiblement à la déviation angulaire.

Des expériences 6 et 7 il semble résulter que, quelle que soit la longueur du fil que l'on met en communication avec la pile, si, après avoir uni l'un des bouts du fil d'un galvanomètre à la seconde extrémité de ce fil, on ajoute à

l'autre bout du fil du galvanomètre un fil de longueur constante, les déviations de l'aiguille du galvanomètre resteront sensiblement les mêmes. Ainsi, l'aiguille du galvanomètre marquait $6^{\circ} 1/2$, lorsque après l'avoir placé très-près de la pile on unissait son second bout avec un fil de 177 kilomètres de longueur; 5° lorsque après avoir interposé entre la pile et le galvanomètre une longueur de 885 kilomètres, on ajoutait à son second bout la même longueur primitive de 177 kilomètres. Ainsi encore, pour 354 kilomètres de fil placés au delà du galvanomètre installé près de la pile, la déviation était de 12° , la même absolument que si, après avoir interposé entre le galvanomètre et la pile, 708 kilomètres de fil, on ajoutait après le galvanomètre 354 kilomètres de fil. Ainsi enfin, pour 531 kilomètres de fil, placés au delà du galvanomètre, près de la batterie, la déviation était de 18° , et 15° , lorsqu'en avant et en arrière du galvanomètre, on interposait 531 kilomètres de fil. Si la pile avait été parfaitement constante, les écarts que l'on remarque entre les nombres des expériences, entre 15° , par exemple, et 18° , eussent été beaucoup plus petits.

N'est-on pas en droit de conclure de ce qui précède, que quelle que soit la longueur du fil attaché au pôle isolé d'une pile, ce fil est chargé d'électricité au même degré de tension sur sa longueur entière; de telle sorte que, si l'on ajoute un second fil isolé à l'extrémité libre du premier, il manifestera exactement les mêmes phénomènes, en nature et en intensité, que ceux qui se seraient produits, si le fil additionnel avait été mis en communication immédiate avec le pôle de la pile.

Ces expériences décisives prouvent donc :

1° Que, conformément à la théorie que nous avons donnée, les électricités dégagées aux pôles de la pile empruntent successivement aux différentes parties des conducteurs en rapport avec ces pôles, les électricités contraires néces-

saires à leur neutralisation jusqu'à ce que ces conducteurs se soient trouvés complètement chargés.

2° Que les deux électricités dégagées aux deux pôles de la pile sont solidaires l'une de l'autre dans leur mouvement, puisque l'une ne peut charger un conducteur sans que l'autre n'opère pareille charge sur un autre conducteur présentant la même résistance.

3° Que de cette solidarité résulte une simultanéité de décharge aux deux pôles quand bien même la décharge effective ne s'effectuait qu'à un des pôles seulement; car, d'après ce qui a été dit précédemment, la charge du conducteur ne se fait alors qu'au moment même de la fermeture du circuit.

4° Que le mouvement des fluides s'effectue du milieu du circuit vers la pile quand la fermeture du courant est opérée au milieu du circuit, car c'est à partir de ce point que s'effectuent alors les premières recompositions électriques qui produisent le courant.

5° Que le contraire a lieu quand la fermeture du courant est faite à l'un des pôles de la pile, parce que, dans ce cas, le conducteur n'étant chargé qu'au moment même où le circuit est fermé, c'est près de la pile que se font les premières recompositions qui déterminent la naissance du courant.

6° Que la terre ne remplit pas le rôle de simple conducteur, puisque, quand elle est interposée dans le circuit, le mouvement des fluides, au lieu de s'opérer simultanément des deux pôles de la pile vers le milieu du courant (quand la fermeture du courant est faite à l'un de ces pôles), s'opère successivement depuis le pôle touché jusqu'à l'autre pôle. Le sol ne joue donc que le rôle d'un absorbant ou, comme on l'admet pour l'électricité statique, le rôle de réservoir commun.

7° Que la nécessité de mettre la pile en communication

avec le sol, pour charger un conducteur isolé, vient de l'impossibilité dans laquelle on est de charger ce conducteur avec l'électricité dégagée au pôle avec lequel il communique sans que l'électricité solidaire dégagée à l'autre pôle ne soit absorbée dans la même proportion.

8° Que la communication avec le sol du fil composant un circuit n'est établie que pour absorber l'électricité à mesure qu'elle charge le conducteur, et donner lieu par là à un courant.

9° Que l'impossibilité matérielle dans laquelle on se trouve d'obtenir un isolement complet est une cause déterminante d'absorption constante qui crée dans un circuit ouvert un courant permanent augmentant avec sa longueur.

10° Que, dans un circuit fermé, le mouvement des deux électricités doit se faire également de part et d'autre à partir des pôles de la pile jusqu'au milieu du circuit, d'où il résulte que chaque moitié du circuit est chargée d'une électricité différente.

Réactions extérieures des courants. — D'après ce que nous venons de dire de la transmission électrique dans le circuit d'une pile, on serait en droit de conclure que les courants n'ont pas de direction déterminée dans leur mouvement, puisque les deux électricités marchent à la rencontre l'une de l'autre; mais si l'on considère que le galvanomètre qui accuse la présence de ces courants doit se trouver impressionné d'une manière tout opposée, suivant que c'est le courant d'électricité positive ou le courant d'électricité négative qui agit sur lui, on s'assurera que l'effet produit par l'électricité positive se trouve maintenu par l'électricité négative, précisément en raison de la marche contraire des deux courants et de l'effet diamétralement opposé qui se trouve exercé dans les deux cas. Il s'ensuit donc que, par rapport au galvanomètre, le courant a un sens déterminé qui fait dévier à gauche ou à droite sur toute l'étendue du

circuit l'aiguille aimantée, suivant la manière dont les pôles de la pile se trouvent mis en rapport avec les extrémités du circuit qui doit agir sur cette aiguille. On est convenu de dire que le courant voltaïque marche du pôle positif de la pile au pôle négatif, mais c'est tout à fait une expression de convention.

Depuis OErsted qui a découvert le premier les réactions extérieures des courants électriques sur les corps magnétiques, et Faraday qui a découvert celles qui sont exercées sur les corps non magnétiques, on s'est beaucoup occupé de ce genre de phénomènes, auxquels on a donné le nom de phénomènes d'induction, et qui constituent actuellement une des parties les plus curieuses de la physique; mais, selon moi, on n'a encore envisagé la question que sous un seul aspect et on n'a pas cherché à séparer celles de ces réactions que l'on peut appeler *réactions statiques*, parce qu'elles s'exercent d'après les lois des phénomènes électriques statiques, des réactions *purement dynamiques* qui sont le propre de l'électricité en mouvement. J'ai envoyé plusieurs mémoires à l'Institut sur cette question, et les dernières expériences de M. Faraday ont complètement justifié mes prévisions.

De même que l'électricité développée à l'état de repos a ses lois, de même l'électricité développée à l'état de mouvement a les siennes. Pour le premier genre de manifestation électrique la loi fondamentale est que les électricités de nom contraire s'attirent, tandis que les électricités de même nom se repoussent; pour le second, la loi fondamentale est que les courants marchant dans le même sens s'attirent quand ils sont parallèles, et cherchent à se placer parallèlement pour marcher dans le même sens quand ils sont croisés, tandis qu'ils se repoussent quand l'inverse a lieu. Vouloir rapporter à la même loi ces deux sortes de lois fondamentales appartenant à un genre de manifestation électrique diffé-

rent, et chercher à les expliquer l'une par l'autre, ce serait vouloir allier deux éléments complètement hétérogènes. Ainsi, au premier abord, il peut paraître extraordinaire que deux courants qui ont les mêmes électricités opposées l'une à l'autre sur leurs conducteurs, s'attirent au lieu de se repousser, ce qui devrait avoir lieu d'après les lois de l'électricité statique; mais c'est qu'alors l'induction n'est pas statique mais bien dynamique, et de plus ces courants exercent leur action *indépendamment* l'un de l'autre. On peut avoir une preuve bien frappante de la dissemblance de ces deux sortes de réactions, quand on cherche à provoquer un courant en unissant le pôle positif d'un élément de pile avec le pôle négatif d'un second élément isolé complètement du premier; on n'obtient aucun courant et pourtant les deux électricités contraires sont produites sur les appendices polaires qui sont unis; mais comme les deux électricités ne proviennent pas de la même source, leur neutralisation ne peut s'effectuer.

Dans le cas des réactions réciproques de deux courants existant séparément et indépendamment l'un de l'autre, les lois des réactions statiques n'existent donc plus, et font place aux lois de l'électricité dynamique qui sont tout aussi nettement déterminées.

Il ne faudrait pourtant pas croire que des courants, par cela même qu'ils sont courants, n'exercent plus de réactions statiques, bien au contraire; et par les expériences curieuses que nous allons rapporter on pourra voir quelle influence ces sortes de réactions exercent sur la distribution du fluide électrique dans les conducteurs des circuits, et même sur la vitesse de sa propagation.

Expériences de M. Faraday. — Réactions statiques des courants. — Les fils recouverts de gutta-percha qui ont été mis à la disposition de M. Faraday, pour ses expériences, pouvaient fournir un circuit de plus de 160 kilomètres de

longueur, et par une disposition ingénieuse mise en pratique par M. Stateham ils pouvaient être submergés à volonté en tout ou partie.

Après s'être assuré du parfait isolement de ces fils, M. Faraday procéda à ses expériences en employant une pile isolée de 360 couples, dont les plaques avaient 4 pouces de hauteur sur 3 pouces de largeur.

Première série d'expériences. — « L'un des pôles de la pile isolée, dit M. Faraday, était uni à la terre par un très-bon conducteur, on approchait l'autre pôle de l'une des extrémités du circuit submergé, on établissait le contact pendant un instant, puis on le rompait : alors une personne en communication avec le sol touchait le fil et recevait une violente secousse. Cette secousse était plutôt celle d'une pile voltaïque que d'une batterie électrique ; la décharge n'était pas instantanée ; en touchant rapidement plusieurs fois de suite, on avait une série de petites secousses dont le nombre a été jusqu'à quarante. Quand on avait laissé s'écouler un certain temps entre la charge et la décharge du fil, la secousse était moindre, mais elle était encore sensible après deux, trois, quatre minutes et même plus. Lorsque, après avoir mis le circuit en contact avec la pile, on unissait ses deux extrémités avec celle d'une fusée de Stateham, la fusée s'enflammait, même trois et quatre secondes après que le fil était séparé de la pile. Mis de la même manière en communication d'abord avec la pile, puis avec un galvanomètre, le circuit immergé touché par la pile produisait une déviation considérable, même après vingt ou trente minutes. Lorsque le galvanomètre isolé était en contact permanent avec une des extrémités du circuit submergé, on faisait communiquer le pôle de la pile avec l'autre fil du galvanomètre, il était très-curieux de voir avec quelle rapidité l'électricité se précipitait dans le fil ; mais ce premier effet produit, et quoiqu'on continuât le contact, la déviation ne

dépassait pas 5 degrés tant était grand l'isolement. En séparant le pôle du fil du galvanomètre et touchant celui-ci avec un conducteur allant à terre, on voyait de même l'électricité revenir précipitamment du fil, et maintenir l'aiguille pendant un certain temps, déviée en sens contraire de la déviation qu'elle avait subie au moment où le contact avait été établi.

« Ces effets se produisaient également bien avec l'un ou l'autre pôle de la pile, l'une ou l'autre extrémité du fil ; il importait peu que l'on établît et rompit le contact à la même extrémité ou à deux extrémités différentes. Il avait été nécessaire d'employer une pile de grande intensité pour des raisons que nous dirons tout à l'heure ; cette pile décomposait dans un temps donné une très-petite quantité d'eau ; une pile de Grove de huit ou dix couples, beaucoup plus puissante sous le rapport de la décomposition de l'eau, aurait beaucoup moins affecté le fil.

« Lorsqu'on en vint à expérimenter de la même manière les 40 lieues de fil suspendu dans l'air, et aussi parfaitement isolé, comme on s'en assura par une expérience positive, on n'observa rien de semblable : il n'y avait plus ni secousses, ni inflammation des fusées, ni déviations sensibles.

Deuxième série d'expériences. — « Des fils revêtus de gutta-percha, et enfermés ensuite dans des tubes de plomb et de fer, ou enfouis dans la terre, ou plongés dans la mer, durent être ensuite expérimentés.

« De semblables fils souterrains existent entre Londres et Manchester ; lorsqu'ils sont tous unis en une seule série, le circuit résultant a plus de 500 lieues de longueur ; et comme à Londres ce circuit revient plusieurs fois, il peut être observé par un même expérimentateur sur des points séparés par une distance de plus de 133 lieues, au moyen de galvanomètres placés en ces points de retour. Ce circuit entier, sa moitié, son quart, présentaient tous les phénomènes

déjà décrits ; avec cette seule différence qu'à cause de l'isolement moins parfait, la charge électrique persévérait moins. Considérons une longueur de ce fil égale à 250 lieues, et supposons qu'on installe trois galvanomètres, l'un a à la première extrémité, le second b au milieu, et le troisième c à la seconde extrémité, tous trois placés dans le cabinet de l'expérimentateur ; admettons enfin que le troisième galvanomètre c soit en parfaite communication avec la terre. En amenant le pôle de la pile en contact avec le fil à travers le galvanomètre a , l'aiguille était immédiatement déviée ; l'aiguille de b était déviée à son tour, mais après un temps sensible ; et l'aiguille de c ne se mouvait qu'après un temps plus long encore. Avec le circuit entier de 500 lieues, il s'écoulait deux secondes avant que le courant électrique atteignit le troisième galvanomètre.

« De plus, si lorsque les trois aiguilles étaient déviées, mais inégalement, à cause des déperditions le long de la ligne, on interrompait le contact avec la pile en a ; l'aiguille du premier galvanomètre revenait subitement à zéro ; l'aiguille b ne revenait à zéro que plus tard, et l'aiguille c plus tard encore. Un courant venait donc de la seconde extrémité du circuit, alors qu'il n'y avait plus de courant à sa première extrémité. Ce n'est pas tout, en touchant rapidement en a avec le pôle de la pile, on pouvait faire dévier l'aiguille, et la voir revenir à zéro, avant que le courant eût atteint l'aiguille b : celle-ci avait de même le temps de dévier et de revenir à sa position d'équilibre, avant que le courant fût arrivé en c . Une onde électrique avait ainsi été lancée dans le circuit ; elle l'avait parcouru de proche en proche dans toute sa longueur, et elle s'était rendue elle-même sensible à des intervalles de temps successifs, sur différents points du circuit. Il était toujours possible, en réglant convenablement les contacts établis avec la pile, d'obtenir deux ondes simultanées, se suivant l'une l'autre, de sorte qu'au moment où

l'aiguille *c* était affectée par la première onde, l'aiguille *a* ou l'aiguille *b* fussent déviées par la seconde. Il n'est pas douteux qu'en multipliant les galvanomètres et observant avec attention on eût pu obtenir à la fois quatre ou cinq ondes, marchant simultanément à la suite l'une de l'autre.

« Si après avoir établi et rompu le contact de *a* avec la pile, on mettait immédiatement *a* en communication avec la terre, on voyait apparaître de nouveaux phénomènes intéressants. Une portion de l'électricité entrée dans le fil, revenait sur ses pas, et repassait en *a* en faisant dévier l'aiguille en sens contraire ; de sorte que les courants circulaient aux deux extrémités du fil dans des directions différentes, alors même que la source électrique avait cessé d'alimenter le fil. Si *a* était mis très-rapidement en contact avec la pile d'abord, puis subitement avec la terre, on voyait un courant entrer d'abord dans le fil, et en sortir tout à coup par la même voie, sans que presque rien eût apparu en *b* ou en *c*.

« Avec un circuit de même longueur suspendu en l'air, et expérimenté de la même manière, on ne retrouvait aucun de ces effets, ou du moins ils étaient à peine sensibles ; la déviation à la seconde extrémité du fil, ou en *c*, était infiniment peu en arrière de la déviation en *a* ; et l'on ne pouvait plus observer d'accumulation sensible de la charge électrique dans le fil.

« Il résulte donc de ces curieuses expériences : 1^o que la réaction extérieure d'un courant créé au sein d'un circuit suffisamment isolé, et entouré d'un corps conducteur quelconque, a pour effet de créer dans ce circuit un courant particulier d'électricité statique susceptible de se maintenir développé après même l'interruption du courant voltaïque ;

2^o Que l'effet subséquent de cette réaction statique est de retarder la vitesse de transmission de l'électricité.

L'explication de ces phénomènes est simple, car le fil enroulé de gutta-percha et revêtu d'une enveloppe conductrice

constitue une immense bouteille de Leyde dont le fil métallique est l'armure interne, et dont l'enveloppe conductrice est l'armure externe ¹. Le fil de cuivre, par son contact avec le pôle de la pile, se trouve chargé, comme nous l'avons démontré précédemment, de l'électricité dégagée à ce pôle. Or, cette électricité en agissant à travers la gutta-percha sur la surface de l'eau, ou sur l'enveloppe conductrice constituant l'armure extérieure de cette singulière bouteille de Leyde, décompose son électricité naturelle en condensant sur la surface externe de la gutta-percha l'électricité de nom contraire. Celle-ci à son tour réagissant sur le fluide dont est chargé le fil et sur le fil lui-même, provoque un nouveau dégagement électrique qui est purement statique, et de la condensation générale de ces électricités en présence, à travers une enveloppe isolante, doit résulter nécessairement le ralentissement ou la paralysie partielle du fluide en mouvement dans le fil. En effet, l'électricité développée dans le conducteur par l'action de la pile, se trouve alors soumise à deux forces, l'une qui l'attire contre l'enveloppe de gutta-percha pour s'y condenser, l'autre qui l'attire perpendiculairement à cette direction pour en opérer la recomposition. Ne pouvant céder dans ce cas à l'influence d'une résultante, l'électricité développée continue son mouvement, mais d'une manière beaucoup moins prompte et d'autant plus faible que la réaction statique est plus énergique.

Si les phénomènes que nous venons d'étudier ne se reproduisent pas quand les expériences se font à l'air libre, c'est parce que l'air ne peut pas remplir, comme l'eau ou l'enveloppe métallique, la fonction d'armure extérieure, ou

1. Dans les conditions d'expérimentation dans lesquelles M. Faraday s'était placé, la surface entière du fil de cuivre représentait une armure de 8,300 pieds carrés, et la surface de l'eau en contact avec la gutta-percha était de 33,000 pieds carrés.

du moins la remplit très-mal. Du reste, tous ces phénomènes que j'avais pressentis depuis longtemps ¹ se reproduisent avec les courants magnétiques des aimants. Ainsi, quand un aimant est muni de son armature, le courant magnétique doit être paralysé dans sa marche, car la réaction statique échangée entre lui et l'armature dont les fluides se trouvent alors décomposés, rejaillit sur le courant magnétique et tend à le condenser. Dans ce cas, il est vrai, il n'y a pas d'enveloppe isolante, mais la force coërcitive en tient lieu. C'est en vertu de cette réaction que des courants d'induction sont créés dans des fils recouvrant les branches d'un aimant permanent, lorsqu'on fait tourner devant ses pôles une armature de fer doux.

Par la même raison, un morceau de fer que l'on enfonce à l'intérieur d'un solénoïde dont le conducteur est en fer doux, n'est pas attiré comme quand le conducteur est en cuivre, car une réaction statique s'est échangée entre le morceau de fer qui est devenu aimant et le fer à l'état naturel du conducteur, et cette réaction a paralysé la réaction dynamique, c'est-à-dire la réaction du courant magnétique sur le courant électrique.

Si un aimant qui est présenté à un autre aimant plus puissant est attiré, bien que des pôles semblables soient en présence, cela tient à ce que la réaction statique l'a emporté sur la réaction dynamique. La permutation de pôles que l'on observe sur un barreau d'acier qui a été soumis à l'induction d'un électro-aimant très-puissant, permutation qui se manifeste aussitôt que le barreau a été enlevé de dessus l'aimant inducteur, est encore une preuve de la différence des deux réactions. Enfin, l'anéantissement d'action d'un aimant cylindrique creux, à l'intérieur duquel on a introduit un cylindre de fer doux, prouve surabondam-

1. Voir ma théorie du magnétisme statique et du magnétisme dynamique.

ment l'importance du rôle que jouent dans les phénomènes électriques les réactions statiques et dynamiques des courants. Du reste, il est à remarquer que ces sortes de réactions sont beaucoup plus sensibles dans les réactions magnétiques que dans les réactions électriques, parce que l'induction latérale est plus puissante.

Un fait assez curieux est à signaler dans ce genre de réactions, c'est qu'on peut, à volonté, faire prédominer l'une ou l'autre des deux réactions, soit en augmentant ou en diminuant la tension de la pile pour les courants électriques, soit en rapprochant ou en éloignant des aimants leurs armatures ou les pièces qui en tiennent lieu pour les courants magnétiques. Ainsi, un solénoïde de fer doux n'attirera pas un cylindre de fer qu'on fera entrer dans son intérieur, avec un seul élément de Bunsen; avec trois l'effet aura lieu; un courant d'induction très-énergique sera créé dans l'appareil de Breton quand l'armature sera presque au contact des pôles de l'aimant, tandis qu'il sera à peine sensible avec 2 ou 3 millimètres de séparation entre les deux pièces.

Lois de propagation des courants. — Les lois de propagation des courants ont été, comme je l'ai déjà dit, l'objet de nombreuses et importantes recherches de la part de MM. Ohm, Pouillet, Fescheuer, Wheatstone, et il serait sans doute intéressant d'exposer ici le mode d'expérimentation qui a été suivi par ces illustres savants; mais comme cette question est traitée avec détails dans tous les ouvrages de physique, je résumerai ces lois en disant :

1° Que l'intensité d'un courant est toujours la même en tous les points d'un circuit, que celui-ci soit composé de métaux de différente nature et de différents diamètres ;

2° Que l'intensité d'un courant est en raison inverse de la longueur totale du circuit, et en raison directe de sa section et de sa conductibilité ;

3° Que la longueur totale d'un circuit n'est pas sa longueur apparente, mais celle de toutes les diverses parties à travers lesquelles circule le courant (y compris même la pile), réduites à une même section et à une même conductibilité ¹;

4° Que l'intensité d'un courant est indépendante de la tension de la pile, mais dépend essentiellement de la quantité d'électricité dégagée dans un temps donné ;

5° Que la tension d'un courant est proportionnelle à la conductibilité du circuit, et en raison inverse de sa résistance ;

6° Que l'intensité d'un courant sur lequel est greffé un autre circuit, peut être représentée dans les différentes parties du circuit par les formules suivantes :

$$X = t. \frac{(KP+1)}{KP+1-n} \quad Y = t. \frac{(KP)}{KP+1-n} \quad Z = t. \frac{1}{KP+1-n}$$

X, Y, Z exprimant la valeur inconnue dans le circuit principal, le circuit partiel (compris entre les deux points de jonction de la dérivation) et le circuit dérivé, et les quantités t , K , P et n désignant l'intensité du courant primitif, le rapport du courant dérivé à l'intervalle de dérivation, le dénominateur de la fraction exprimant la section du courant dérivé, et le rapport de l'intervalle de dérivation à la longueur du circuit primitif ;

7° Que de la discussion de ces formules il résulte : 1° que

1. D'après les expériences de M. Breguet, la résistance intérieure des piles de Bunsen et de Daniell, estimée en longueur de fil de fer galvanisé de 4 millimètres de diamètre (celui des lignes télégraphiques), serait représentée par les nombres suivants :

Pile de Bunsen bien préparée	141 mètres.
Id. servant depuis quinze jours	2070
Pile de Daniell avec eau acidulée	200
Id. avec eau pure	800
Id. avec diaphragme en vessie	106

dans le cas où les points d'attache du fil de dérivation sont contigus l'un à l'autre, le courant passe tout entier par le circuit primitif, et n'est par conséquent pas altéré par la dérivation ; 2° que dans le cas où la dérivation est prise aussi près de la source électrique qu'il est possible, de manière à ce que l'intervalle de dérivation soit égal au circuit lui-même, le courant partiel est égal au courant primitif, ou en d'autres termes, que toute l'électricité qui passait dans l'ancien circuit y passe encore sans aucune modification, et la source donne au fil additionnel de dérivation toute la quantité d'électricité qui convient à sa longueur, à sa section et à sa conductibilité ; 3° que dans le cas où le fil de dérivation est très-court, par rapport à l'intervalle de la dérivation, l'intensité du courant dérivé est plus grande que celle du courant partiel, et peut devenir telle que le courant ne passe plus dans l'intervalle de dérivation ; 4° que quand l'intervalle de dérivation est de la même longueur que le circuit dérivé, le courant se partage également entre les deux circuits ;

8° Que toutes les lois précédentes sont applicables aux liquides lorsqu'ils sont employés comme conducteurs.

Je ne parlerai pas en ce moment des rhéomètres, du rhéostat et du galvanomètre, à l'aide desquels on a pu déterminer ces différentes lois et la valeur des constantes des courants voltaïques. C'est une question que je traiterai dans un chapitre spécial consacré aux instruments électriques d'expérimentation. Je dirai seulement que quand on veut apprécier approximativement l'intensité et la tension de courants très-énergiques, pour lesquels l'emploi des rhéomètres et des rhéostats serait insuffisant, on pourrait avoir recours à l'effet calorique produit, pour la mesure de l'intensité, et à la résistance des liquides pour la mesure de tension.

Conductibilité des corps pour l'électricité. — Nous avons

vu que les différents corps de la nature pouvaient être rangés, par rapport à l'électricité développée sur eux, en corps bons conducteurs et en corps mauvais conducteurs de l'électricité; mais tous les corps qui appartiennent à l'une ou à l'autre de ces deux catégories ne possèdent pas au même degré leur pouvoir conducteur ou isolant, et ce qui est le plus étonnant, c'est que leur état moléculaire, leur densité, leur état de cohésion et leur température influent considérablement sur le degré de conductibilité dont ils sont susceptibles.

En général, les corps solides perdent de leur conductibilité à mesure que leur température s'élève, tandis que le contraire a lieu pour les liquides et surtout pour les gaz qui, d'isolants, peuvent devenir conducteurs.

Pourtant, quelques corps solides font exception à la règle qui les concerne; ainsi, la glace, le chlorure de plomb, l'iode, les chlorures alcalins, le verre, le sulfure d'argent, le biiodure de mercure, le fluorure de plomb, qui ne sont pas conducteurs à la température ordinaire, acquièrent cette faculté quand ils sont fondus, et même souvent avant leur point de fusion.

Généralement ce sont les dissolutions salines qui, parmi les liquides, ont le pouvoir conducteur le plus développé, et ce pouvoir augmente avec la quantité de sel contenue dans la dissolution, à l'exception pourtant du nitrate de cuivre et du sulfate de zinc. L'élévation de leur température surexcite à tel point ce pouvoir conducteur, qu'en passant de 0° à 100° les dissolutions de sulfate de cuivre et de sulfate de zinc acquièrent une conductibilité environ trois fois et demie plus forte.

Plusieurs physiciens se sont occupés de déterminer numériquement les rapports de ces diverses conductibilités pour les différents métaux. Malheureusement les chiffres qu'ils ont obtenus sont loin d'être concordants; voici du

reste le résultat des expériences entreprises par MM. Davy, Becquerel et Pouillet.

MÉTAUX.	DAVY.	BECQUEREL	POUILLET.
Cuivre.	100	100	100
Or.	73	98,6	84
Argent.	109	73,6	116
Zinc.	"	28,5	"
Platine.	18	10,4	13
Fer.	14,5	15,8	16
Étain.	"	15,5	"
Plomb.	69	8,3	"
Laiton.	"	"	12

L'aluminium, nouveau métal introduit dans l'industrie par M. Deville, doit être placé à côté des métaux qui conduisent le mieux, l'or, le cuivre et l'argent.

En général, les métaux recuits ont un pouvoir conducteur plus grand que les métaux écrouis ; cela résulte vraisemblablement du changement de densité qui survient dans le métal quand il est soumis à cette double action. Les métaux réduits en *poudre* sont aussi moins bons conducteurs qu'à l'état solide. Du reste, un fait remarquable à constater, c'est que le pouvoir conducteur des corps pour l'électricité est à peu près dans les mêmes rapports que leur pouvoir conducteur par rapport à la chaleur.

Corps isolants. — Pour l'électricité dynamique (fournie par les piles), à la température ordinaire, et avec une longueur très-petite de circuit, le bois, l'ivoire, la corne, le papier, le carton, les étoffes et les corps fibreux en général, suffisent parfaitement pour isoler un circuit ; mais pour

l'électricité statique, et même l'électricité dynamique circulant à travers des conducteurs de grande étendue, ces corps ne sont pas suffisamment isolants, et il faut alors avoir recours à des corps résineux ou vitrifiés, tels que le verre, la porcelaine, la terre cuite, la résine, la cire à bouteille, la gomme laque, la gutta-percha, le caoutchouc durci, etc., etc.

Parmi ces substances, les unes sont susceptibles d'une fusion facile; ce sont la résine, le soufre, la cire à bouteille, la gomme laque, etc., mais elles sont très-fragiles; les autres peuvent se mouler facilement et ne sont pas susceptibles de se casser, ce sont la gutta-percha, le caoutchouc durci, le bitume, etc.; en revanche, la première de ces trois substances, la gutta-percha, ne peut pas supporter de frictions, et se fendille à l'air. Enfin, les autres sont plus ou moins résistantes, mais elles exigent toute une fabrication pour être appropriées à l'usage qu'on veut en faire.

De ces différents corps que nous venons de passer en revue, c'est encore le caoutchouc durci qui présente le plus d'avantages dans la construction des appareils; il est susceptible d'un grand poli, se moule parfaitement, et est suffisamment isolant pour qu'on ait pu le substituer avec avantage au verre dans les machines électriques.

Les liquides ne sont pas tous susceptibles de conduire l'électricité; il en est un certain nombre qui, comme les corps solides, sont complètement isolants. Ce sont principalement les huiles, les essences, l'alcool, le sulfure de carbone, etc.; ce dernier corps surtout est remarquable sous ce rapport.

Du reste, si on compare le degré de conductibilité des liquides par rapport aux métaux, on peut les supposer pour une certaine tension électrique presque tous isolants. En effet, la solution de sulfate de cuivre qui, de tous les liquides, est celui qui conduit le mieux l'électricité, offre à la température ordinaire une résistance 16 millions de fois plus grande que celle que présente le cuivre métalli-

que. C'est pourquoi, quand les courants électriques ont une grande tension, on peut obtenir au milieu des liquides une étincelle plus ou moins brillante, comme à l'air libre.

Réactions réciproques des électricités développées par deux sources différentes sur le même conducteur. — Puisqu'une pile, dont on augmente successivement les éléments, trouve toujours moyen de soutirer au conducteur, jusqu'à sa complète fusion, les électricités qui lui sont nécessaires pour opérer les recompositions provoquées par elle, on peut en conclure que pour une source d'électricité qui est faible, la quantité d'électricité séparée dans chaque molécule est loin de représenter celle que cette molécule pourrait fournir dans un instant donné, et que la neutralisation incessante des fluides qui a lieu dans la pile emprunte à toutes les molécules du conducteur et non à une partie d'entre elles, la somme d'électricité nécessaire pour qu'elle ait lieu. D'un autre côté, il est démontré, par l'expérience de la non-production de courant, quand on unit les pôles différents des deux piles séparées, que les neutralisations nécessaires pour la manifestation d'un courant ne peuvent se faire que quand les deux électricités opposées proviennent de la même source. On est donc en droit d'admettre qu'un même conducteur peut être impressionné à la fois par deux manifestations électriques différentes, et conduire, par conséquent, deux courants électriques différents dirigés dans le même sens ou en sens inverse; seulement, dans le premier cas, la réaction extérieure sera doublée, tandis que, dans le second, cette réaction n'existera plus si les deux courants sont de même force, ou sera différentielle s'ils sont d'inégale force. Par la même raison, un conducteur dans lequel circulera un courant pourra être influencé par la machine électrique et donner lieu à des décharges comme s'il était en son état naturel.

Il y a longtemps que ces phénomènes ont été mentionnés

par moi à l'Académie des sciences, et un dernier mémoire, contenant des expériences nombreuses faites à ce sujet, a été même imprimé dans les comptes-rendus du mois d'octobre 1852.

Dans mes recherches expérimentales à ce sujet, je m'étais moins appliqué à démontrer le phénomène en lui-même, qu'à le vérifier au point de vue de la confirmation des idées théoriques que je m'en étais faites. Mais, de la discussion approfondie de la question, il est résulté que l'expérience directe ne prouve pas le fait d'une manière rigoureuse, car on peut toujours objecter, qu'au lieu de passer par le même conducteur, les deux courants contraires préfèrent passer par les deux piles qui leur offrent des dérivations assurées et à travers lesquelles ils peuvent circuler dans le même sens; mais M. Masson a mis ce fait hors de doute au moyen des courants d'induction de la machine de Ruhmkorff que l'on peut suivre à l'œil dans une partie de leur parcours. Effectivement, en faisant passer au travers de l'œuf philosophique dans lequel on a fait le vide deux courants contraires issus de deux machines d'induction, on retrouve sur les deux boules de l'œuf la lumière bleue qui ne se voit qu'à l'une d'elles quand un seul courant les traverse. Donc, pour que cette manifestation ait lieu, il faut bien que les courants passent ensemble dans le même conducteur. Les réactions physiologiques des mêmes courants prouvent aussi l'existence simultanée des deux courants inverses. Car, en se mettant en rapport avec deux courants d'induction dirigés en sens inverse et provenant de deux appareils identiques, on en ressent les commotions et, pour cela, il faut bien qu'ils passent ensemble à travers le corps. Il est vrai qu'ici on pourrait attribuer la commotion au courant différentiel qui existe toujours, puisque deux courants ne peuvent jamais être mathématiquement égaux; cependant la commotion est assez forte pour empêcher le

doute à cet égard ; mais dans la première expérience il ne peut en être ainsi, puisque les deux boules présentent la même lumière bleue, ce qui n'aurait pas lieu sous l'influence d'un courant différentiel.

M. Gaugain a voulu nier cette faculté de transmission des courants en sens contraire, mais les raisons qu'il a données ne me semblent pas concluantes. Quoi qu'il en soit, un fait certain que l'expérience m'a démontré, *c'est qu'un circuit électrique sur lequel on greffe un autre circuit de source différente, peut servir de conducteur à ce dernier, mais il s'établit alors une double dérivation qui réagit en affaiblissant ou en renforçant le courant primitif suivant qu'on considère le circuit qu'il parcourt à droite ou à gauche des points où se trouve greffé le deuxième circuit. Alors les intensités différentes du courant résultant dans les diverses parties de deux circuits peuvent être calculées d'après les formules des courants dérivés*¹.

Réactions dynamiques des courants. — Les réactions dynamiques que les courants exercent les uns sur les autres, ou sur les corps magnétiques aimantés, se rapportent toutes au principe suivant, qui est, comme nous l'avons déjà dit, pour ce genre de réactions des courants, ce qu'est la loi des attractions électriques pour leurs réactions statiques :

Les courants électriques qui marchent dans le même sens, s'attirent, tandis qu'ils se repoussent quand ils marchent en sens opposé.

Il résulte en effet de ce principe :

1° Que les courants, de quelque manière d'ailleurs qu'ils soient placés les uns par rapport aux autres, tendent toujours à se placer parallèlement les uns à côté des autres, en marchant dans le même sens. Car ils se trouvent attirés ou repoussés jusqu'à ce qu'ils aient pris cette position, qui est celle de leur équilibre ;

1. Voir les comptes rendus de l'Académie des sciences, année 1852.

2° Qu'un courant doit agir d'une manière différente d'un côté et de l'autre de son plan, et se comporter, conséquemment, comme un véritable aimant dont les pôles seraient annulaires et distribués sur la périphérie du conducteur à gauche ou à droite du plan du circuit, car le sens du courant dans le circuit est différent, par rapport à un courant fixe, suivant qu'il se présente d'un côté ou de l'autre de son plan ;

3° Que la périphérie externe ou interne d'un circuit fermé doit agir différemment aux extrémités opposées des différents diamètres quand les courants sont placés dans le même plan ; et on le conçoit aisément, si l'on réfléchit qu'à l'égard d'un objet dont la position reste la même, le courant marche dans un sens différent aux deux extrémités opposées de chaque diamètre du circuit ;

4° Qu'une hélice métallique, étant composée d'autant d'aimants qu'il y a de spires, puisque chaque spire constitue un circuit à part exerçant une action dynamique différente d'un côté et de l'autre de son plan, constitue un seul et même aimant, ayant ses deux pôles et sa ligne neutre, ou plutôt sa région neutre, car les pôles opposés de toutes les spires comprises entre les spires extrêmes, se neutralisent ;

5° Que, par réciproque, un aimant peut être considéré comme une hélice traversée par un courant qui est né, dans l'origine, sous l'induction d'un courant électrique, ou du courant magnétique d'un autre aimant, comme nous l'avons vu précédemment,

6° Que le courant magnétique dans les aimants marche de l'est à l'ouest, dans le sens ascendant ;

7° Que pour satisfaire à la loi formulée n° 1, l'aiguille aimantée doit se mettre en croix sur le courant, en tournant son pôle austral à droite ou à gauche du circuit, suivant le sens de ce courant ;

8° Que dans cette réaction, la direction de l'aiguille vers

l'ouest, ou vers l'est, dépend, quand le courant est horizontal et parallèle à l'axe de l'aiguille, de sa position au-dessus ou au-dessous du courant; quand le courant est horizontal et oblique, par rapport à l'axe de l'aiguille, du sens de son inclinaison par rapport au courant; quand le courant est vertical, de la position de celui-ci d'un côté ou de l'autre du plan de sa ligne neutre;

9° Que les mêmes réactions pouvant s'exercer par rapport à l'inclinaison de l'aiguille, on peut conclure pareillement que la déviation de celle-ci dans ce sens dépend : 1° quand le courant est horizontal, de la position perpendiculaire ou oblique de celui-ci, par rapport à l'axe de l'aiguille, ou de sa position dans le plan même de l'aiguille, à la condition d'être parallèle à son axe; 2° quand le courant est vertical, de l'inclinaison de celui-ci par rapport à la section de la ligne neutre;

10° Que toutes les réactions magnétiques qui viennent d'être passées en revue, dans l'hypothèse d'un courant rectiligne, se reproduisent de la même manière à l'égard d'un circuit fermé contourné en hélice; car l'action des spires de cette hélice sur l'aiguille étant la même d'un côté comme de l'autre, se trouve neutralisée; de telle sorte, qu'il n'y a que l'action du courant dans le sens direct qui soit effective. Néanmoins, l'action est plus marquée dans celles des positions de l'aiguille, où le courant magnétique et le courant électrique exercent un effet concordant.

A l'aide de ces différentes lois qui dérivent toutes les unes des autres, tous les phénomènes électro-dynamiques, même les plus complexes, peuvent s'expliquer, tels sont : la rotation des aimants sous l'influence des courants, et réciproquement; la rotation des courants sous l'influence d'autres courants, ou des aimants, ou même du globe terrestre qui doit être considéré comme un aimant; la disposition des courants verticaux dans le sens du méridien magnétique;

enfin l'attraction exercée par les aimants sur les courants mobiles.

Effets de certaines réactions extérieures sur les circuits électriques. — Si les circuits aériens ne sont pas soumis aux réactions qui paralysent la vitesse de l'électricité dans les circuits isolés et immergés, ils sont en revanche sujets à d'autres réactions extérieures qui créent en eux, lorsqu'ils ont une certaine étendue, des courants accidentels assez forts quelquefois pour empêcher la marche des appareils. Ces courants accidentels, qui peuvent naître sous l'influence de l'électricité atmosphérique, du magnétisme terrestre et de la différence des températures, comme le prouvent les expériences de MM. Barlow, Baumgartner et Zantedeschi, sont une cause perpétuelle d'inégalité d'action électrique de la part du courant transmis, qui augmente avec la hauteur à laquelle le fil est placé et l'orientation de sa direction. Bien plus même, ces courants accidentels changent de sens suivant qu'il fait nuit ou qu'il fait jour, suivant que les nuages orageux marchent dans une direction ou dans l'autre ; enfin il n'est pas jusqu'aux aurores boréales et à la nature volcanique des terrains qui ne produisent un effet électrique très-marqué sur les fils des lignes télégraphiques. Si l'on joint à ces causes de perturbation les courants dérivés qui se manifestent les jours de pluie, et même les jours humides, par suite de la conductibilité de la vapeur d'eau répandue dans l'air, on comprendra combien il faut de puissance électrique pour vaincre tous ces obstacles, et combien les appareils doivent être sensibles pour fournir de bons résultats.

D'après les recherches de l'abbé Zantedeschi, il paraîtrait que les courants accidentels dus à la différence des températures marcheraient toujours de la station froide à la station chaude, et seraient d'autant plus intenses que la différence de température serait plus grande. Quant à l'effet

produit par l'orientation de la ligne, il est à son maximum quand celle-ci va du nord-est au sud-ouest, et à son minimum quand elle va du sud-ouest au nord-est. Enfin, dans les pays de montagnes, ces courants accidentels prennent une si grande intensité que souvent, à certaines heures du jour, ils opposent un obstacle invincible à la transmission des signaux. Du reste, tous ces courants augmentent considérablement à mesure que l'on se rapproche davantage des points où les extrémités des fils plongent dans la terre.

Dans les circuits mixtes formés d'un fil métallique et d'une couche liquide (c'est le cas des lignes télégraphiques recouvertes de rosée ou de pluie), une réaction électrique toute particulière se manifeste au moment où, après avoir enlevé la pile, on ferme le circuit. On voit en effet apparaître et persister pendant quelque temps un courant secondaire qui, dans le liquide, va en sens contraire du courant primitif. Ce courant, du reste, se manifeste presque en tous temps sur les lignes télégraphiques, sans doute par suite de condensations opérées à sa surface par le fil lui-même. Ces courants n'ont pas encore été bien expliqués.

ORGANISATION ET DISPOSITION DES CONDUCTEURS POUR LES APPLICATIONS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ.

Nous avons déjà dit plus d'une fois que la grosseur des conducteurs devait être en rapport avec la nature de la pile et les dérivations établies sur le circuit, mais beaucoup d'autres considérations doivent entrer en ligne de compte quand il s'agit d'établir ces conducteurs d'une manière définitive et durable; aussi, je dois le dire tout d'abord, cette question, en apparence bien minime, est peut-être l'une des plus délicates des applications électriques et celle qui donne le plus de mécomptes; on pourra en juger.

CONDUCTEURS SIMPLES.

Tout fil ou tout corps métallique peut être employé comme conducteur électrique, mais les effets sont quelquefois bien différents : ainsi tout le monde sait que l'électricité conduite par un fil de fer fournit, quand on ferme le courant, des étincelles beaucoup plus fortes que quand elle suit un fil de cuivre et mieux encore un fil d'argent ; c'est pourquoi ce dernier métal est souvent préféré pour les commutateurs.

Les fils conducteurs peuvent être arrondis ou aplatis. M. Nollet prétend qu'il y a avantage à se servir de ces derniers, mais cet avantage n'est pas encore bien constaté. Quoi qu'il en soit, on peut employer les conducteurs isolés ou non isolés, c'est-à-dire recouverts d'une substance plus ou moins isolante ou livrés à leur brillant métallique. Au premier abord, on peut croire qu'il y a avantage à se servir des premiers ; mais on verra que le fait est contestable. Quand on emploie les fils non isolés, il importe qu'ils soient recouverts d'une préparation qui les empêche de subir les effets détériorants de l'oxydation ; les fils de fer galvanisés sont excellents pour cela.

Les fils isolés avec du coton ne présentent d'avantages sur les autres que par la possibilité qu'ils donnent de les croiser les uns sur les autres et de les mettre plus ou moins en contact sans qu'il y ait déperdition d'électricité ou mélange de courants. Pourtant il ne faut pas toujours se fier à cet isolement, surtout dans les endroits humides. On a bien essayé de les recouvrir en outre de gomme laque ou de gutta-percha liquide ; mais les résultats qu'on a obtenus sont loin d'être satisfaisants.

Les fils recouverts de gutta-percha sont meilleurs, mais ils sont très-chers et ont une grosseur qui les empêche

d'être employés dans les appartements. Ils sont de diverses espèces : ceux qui sont recouverts avec des bandes minces de gutta-percha, soudées ensemble dans l'eau bouillante, sont de plus petite dimension que les autres, mais ils ont l'inconvénient, lorsqu'ils sont exposés à l'air ou au soleil, de se fendre et de tomber en poussière. M. Prudhomme en a cependant construit dernièrement qui sont beaucoup meilleurs et qui peuvent résister davantage.

Les fils recouverts d'une couche épaisse de gutta-percha pâteuse, tels que ceux qui sont sortis des fabriques de MM. Herkemann, Rattier et Guibal sont beaucoup plus résistants et peuvent s'employer avec avantage dans les endroits humides. Pourtant il faut pour qu'ils puissent être enterrés qu'ils soient revêtus d'une deuxième couche de gutta-percha dite *vulcanisée*. Leur isolement est alors beaucoup plus grand et l'action décomposante du sol n'a plus d'action sur eux.

Pour fixer les conducteurs à l'intérieur d'un appartement et les dissimuler le plus possible à la vue, on les entortille ordinairement sur de petits clous d'épingle que l'on a placés aux différents angles des pièces qu'ils doivent contourner; mais ce système est radicalement mauvais. D'abord, si les clous sont fixés sur du plâtre, ils s'oxydent sous l'influence du courant, et le fil lui-même se trouve bientôt rompu. En second lieu, la moindre humidité du mur suffit pour donner au fil une trempe particulière qui occasionne au bout de peu de temps sa rupture. Une chose assez curieuse, c'est que, dans ce cas, les bouts du fil des deux côtés de la solution de continuité se trouvent appointis comme s'ils avaient été rongés par un acide. Pour éviter ces différents cas de rupture, il faut :

1° Que les fils conducteurs soient maintenus à une certaine distance des murs.

2° Qu'ils soient recouverts d'une enveloppe imperméable,

de gutta-percha, quand ils traversent les murs, les plâtras ou des milieux humides.

3^e Que leurs points de suspension ou d'attache soient eux-mêmes revêtus d'une enveloppe isolante.

Après bien des essais onéreux et pénibles, M. Mirand est parvenu à trouver un système d'installation qui paraît être très-bon. Ce système consiste principalement à employer de petits pitons en fer, dont l'anneau est vitrifié, et que l'on substitue aux clous d'épingle dont nous avons parlé. On pratique donc dans les murs, aux différents points où doivent se trouver ces pitons, de petits trous dans lesquels on introduit de petites chevilles en bois, et c'est sur ces chevilles que sont vissés les pitons. Comme l'anneau de ces pitons est suffisamment grand pour permettre l'introduction de plusieurs conducteurs à la fois, on évite, en les employant, la répétition des supports pour chaque conducteur.

Ce système de pitons peut être employé avec le même avantage pour les fils extérieurs non isolés; ils sont un diminutif heureux des supports en porcelaine employés pour les lignes télégraphiques.

En général, il faut employer pour conducteurs des fils assez gros en raison des causes de destruction que nous avons signalées. Le n° 1 du commerce pour les courants de Daniell et le diamètre de 2 millimètres pour les courants Bunsen sont les grosseurs qui conviennent le mieux.

Les fils recouverts de coton peuvent être de la couleur des papiers de tenture contre lesquels ils doivent être appliqués dans les appartements; cependant, il faut, autant que possible, les employer sans teinture, car, pour peu qu'il y ait des acides dans cette teinture, le métal ne tarde pas à s'oxyder sous l'influence du courant, et cette cause, suivant M. Mirand, influe beaucoup dans les cas de rupture des fils que nous avons signalés. Bien plus même, craignant

de la part du courant un effet de réduction, ce même constructeur emploie les fils de fer de préférence aux fils de cuivre. Je ne sais jusqu'à quel point ses soupçons sont susceptibles d'être justifiés.

Il arrive souvent dans plusieurs des applications que nous aurons à exposer, que les conducteurs, tout en se maintenant tendus, doivent se prêter à des mouvements exercés par certaines pièces des appareils auxquelles ils sont liés; il est donc nécessaire alors que les conducteurs soient susceptibles de flexion ou d'extension.

Dans le premier cas, le moyen le plus simple à employer est de les rouler en spirale et de les placer normalement au plan dans lequel s'exécute le mouvement qui doit les faire fléchir; les plis de l'hélice s'abaissent alors les uns sur les autres sans motiver une résistance considérable et sans provoquer dans le fil une action mécanique qui amènerait infailliblement sa rupture.

Dans les appareils électro-médicaux et plusieurs autres d'un autre genre, il importe que les conducteurs soient aussi flexibles que des cordons ordinaires, sans quoi leur manipulation deviendrait longue et difficile: on a donc dû chercher le moyen de combiner les fils métalliques avec les fils de soie pour faire du tout un cordon très-flexible. MM. Breton, frères, ont atteint ce but pour leurs appareils électro-médicaux, dans lesquels l'électricité dégagée est de l'électricité de tension, en substituant aux fils métalliques des feuilles de clinquant. Mais, employés comme conducteurs ordinaires, ces cordons offrent une trop grande résistance au courant. M. Herkemann a mieux réussi en formant une tresse de petits fils de cuivre extrêmement fins et en grand nombre, et en enveloppant la tresse de coton, de soie ou de gutta-percha. Ces conducteurs sont excellents, mais ils sont trop chers pour qu'on puisse les substituer aux conducteurs ordinaires.

Les conducteurs, extensibles dans toute leur simplicité, peuvent être obtenus avec de simples élastiques en laiton; mais, comme il est souvent nécessaire qu'ils soient isolés, il faut que ces élastiques soient elles-mêmes enveloppées dans un tube de caoutchouc extrêmement mince; tout devient alors extensible dans le conducteur.

Conducteurs liquides et terrestres. — Nous avons vu, dans le premier livre, que les liquides et la terre pouvaient transmettre l'électricité et que l'on pouvait, par ce moyen, épargner un fil dans le circuit des lignes télégraphiques. Si ce moyen réussit pour de grandes distances, à plus forte raison peut-il réussir pour de petites. Cependant, comme la résistance apportée par le sol à la transmission électrique, paraît être une quantité constante, la transmission par les fils, pour de *petits circuits*, est infiniment préférable.

Ce que nous disons du sol peut s'appliquer aux liquides. Reste à savoir maintenant comment ceux-ci agissent, quand ils interviennent fortuitement à travers des circuits établis.

On sait que si l'on plonge dans une cavette remplie d'eau les deux conducteurs d'un courant voltaïque de faible tension, celui-ci éprouvera de la part de l'eau une telle résistance que c'est tout au plus si on pourra accuser sa présence à l'aide d'appareils très-sensibles. D'après cela, on pourrait conclure que le *parfait isolement* des conducteurs sur une ligne télégraphique ne serait pas indispensable. Pourtant, l'expérience a démontré le contraire. Quelle est la cause de cette anomalie?...

La voici :

Dans l'expérience que j'ai citée, le courant n'est pas complètement fermé par le liquide, parce que celui-ci, qui est un très-médiocre conducteur, n'est pas impressionné sur une assez grande étendue de sa masse. Augmentez la surface des conducteurs, et vous suppléerez à la mauvaise

conductibilité de l'eau par la grandeur de la section que vous impressionnerez ; c'est ainsi qu'en adaptant aux extrémités des deux conducteurs d'un courant deux plaques métalliques d'une étendue suffisante, on peut rendre l'eau susceptible de conduire le courant aussi bien que le fil lui-même. Voulant m'assurer comment variait l'intensité du courant, suivant la surface des plaques immergées et suivant l'épaisseur de la nappe d'eau interposée entre elles, j'ai entrepris des expériences qu'il n'est pas sans intérêt de rapporter ici :

J'ai enroulé sur deux cylindres de bois de 30 centimètres de diamètre une assez grande quantité de fil de fer galvanisé pour représenter en surface une plaque de zinc de dimensions supérieures à celles qu'on emploie ordinairement dans les transmissions par le sol ; j'ai eu soin de bien isoler les unes des autres toutes les spires du fil métallique, et j'ai plongé ensuite dans un étang, en deux points opposés, les deux cylindres, après les avoir mis en communication avec les conducteurs très-courts d'une pile de Daniell de 8 éléments (petit modèle) très-faiblement chargée. J'ai pris pour organe régulateur une sonnerie électrique de Mirand, car ce que je désirais avant tout était d'avoir un résultat pratique. Voici les résultats que j'ai obtenus :

Quand les deux cylindres étaient totalement immergés, j'obtenais à peu près la même intensité de courant qu'avec le contact immédiat des deux conducteurs, le bruit de la sonnerie était le même. Mais, à mesure que je soulevais les cylindres hors de l'eau, le bruit diminuait et l'appareil finissait par ne plus marcher ; toutefois, la longueur du fil immergé, dans ce dernier cas, ne répondait pas à celle qui était nécessaire pour mettre l'appareil en marche.

Dans ce dernier cas, la longueur du fil immergé était d'environ 34 mètres pour chaque cylindre. Or, comme la

circonférence de mon fil était de $0^m,0055$, la surface en contact avec le liquide était équivalente à une plaque métallique qui aurait eu environ 9 décimètres carrés de surface ou 30 centimètres de côté. Ces chiffres sont tout à fait arbitraires et dépendent essentiellement de la force de la pile, car, dans d'autres circonstances, j'ai trouvé que l'immersion de deux fils de même diamètre que les précédents, et seulement de deux mètres de longueur, suffisait pour mettre la sonnerie en marche.

En mettant les deux cylindres à une distance plus grande, je me suis assuré que les surfaces métalliques immergées, susceptibles de mettre la sonnerie en marche, quand elles étaient rapprochées l'une de l'autre, ne suffisaient plus quand la couche d'eau interposée devenait plus épaisse, et qu'il fallait les augmenter jusqu'à une limite maximum après laquelle les variations devenaient peu sensibles.

De ces différentes expériences, j'ai pu conclure :

1° Que si deux conducteurs immergés ne donnent pas lieu à une fuite d'électricité sensible pour la marche des appareils, cela provient de ce que la surface de ces conducteurs en contact avec le liquide est trop petite; mais que cet effet peut avoir lieu si les conducteurs sont mouillés sur un assez grand nombre de points pour constituer une surface immergée d'une certaine étendue. Alors la déperdition d'électricité est proportionnelle au nombre de points immergés du fil conducteur. Ce fait rend compte de la déperdition qui se manifeste sur les lignes télégraphiques, par suite du mauvais isolement du fil;

2° Que la conductibilité des liquides augmente avec la surface des plaques immergées jusqu'à une certaine limite, qui est en rapport avec la tension de la pile et l'épaisseur de la couche liquide interposée;

3° Que cette conductibilité diminue à mesure que l'épais-

seur de la couche liquide interposée augmente, jusqu'à une certaine limite qui représente probablement le coefficient constant de la résistance apportée par le globe à la transmission de l'électricité ;

4^o Qu'il résulte de là qu'il faut, autant que possible, pour les lignes télégraphiques, les sonneries et autres appareils électriques, éviter les points où il pourrait y avoir des communications humides, soit entre deux conducteurs, soit, à plus forte raison, avec le sol.

Nous avons déjà dit que le degré de conductibilité des liquides, pour une même surface des conducteurs métalliques immergés, dépendait de la tension de la pile ou du courant. On peut en avoir une preuve palpable avec une batterie de Bunsen un peu puissante ; alors, non seulement le courant peut être fermé par le liquide, avec l'intermédiaire seul des conducteurs immergés, mais on peut même obtenir au milieu du liquide lui-même de la lumière électrique. Avec l'appareil de Ruhmkorff le phénomène est encore plus manifeste : ainsi on peut, en exposant les deux conducteurs au-dessus de la surface d'un liquide, échanger des étincelles avec le liquide lui-même. Ces étincelles sont généralement violettes avec l'eau pure, rouges avec les liquides conducteurs, tels que l'eau acidulée, la dissolution de sulfate de cuivre ; mais le plus souvent elles se ramifient à la surface du liquide et donnent lieu à de petits sillons de feu plus ou moins contournés qui indiquent bien la part que prend le liquide dans la transmission électrique.

Il ne faudrait pourtant pas croire que tous les liquides soient également conducteurs ; les huiles et les essences, comme nous l'avons déjà dit, ne le sont pas en général, pas même pour les courants de forte tension. Cette propriété peut quelquefois être mise à profit dans certaines applications électriques. Elle prouve qu'il n'est pas avantageux pour la marche des appareils que ceux-ci soient par trop

huilés, surtout lorsque les communications électriques se font par les axes de rotation ou les articulations des pièces mobiles.

Nous avons déjà parlé au chapitre de la conductibilité de la terre, dans notre premier livre, de la manière d'établir les communications électriques. Pourtant, cette question comporte plusieurs éclaircissements qu'il nous paraît important d'exposer ici.

D'abord, la transmission par le sol n'est possible que quand les puisards (d'un mètre et demi de profondeur), dans lesquels on enterre les plaques, sont pratiqués dans un terrain qui n'est pas obstrué par des couches superposées de pierres. Dans ce cas, il faudrait, pour que la conductibilité eût lieu, que le puisard en question fût un *immense* réservoir d'eau, un étang, par exemple. Dans les terrains secs et pierreux, sur des hauteurs rocailleuses, par exemple, la transmission électrique est assez difficile; mais, à l'aide de certaines précautions, on peut surmonter la difficulté. Dans ce cas, il faut établir le puisard sous un égout quelconque et avoir soin d'interposer entre la plaque de zinc enterrée et la superficie du sol une terre facilement perméable à l'eau, du sable de mer ou de rivière, par exemple. Mais, comme le sable n'est pas bon conducteur, que la plaque de zinc elle-même n'est pas en contact assez intime avec la terre pour établir une conductibilité parfaite, il faut y suppléer en faisant intervenir un conducteur pulvérulent. On entoure donc la plaque de zinc (qu'on a eu soin de rouler comme les zincs des piles de Bunsen), de charbon pilé, et, après avoir arrosé celui-ci, on bouche le trou, en ménageant, comme il a été dit, un petit puisard de sable. On est sûr de cette manière que toutes les fois qu'il vient de la pluie, le terrain, qui entoure la plaque de zinc, se trouve humidifié.

D'après MM. Becquerel il paraîtrait que pour une très-

grande distance, la surface plus ou moins grande des plaques destinées à transmettre l'électricité dans le sol serait indifférente, mais que pour des longueurs de quelques centaines de mètres il y aurait avantage à augmenter la surface de contact de ces électrodes. Cela résulterait suivant eux du peu de résistance opposée par le sol à la transmission du courant. Résistance qui est la même pour une grande distance comme pour une petite.

Pour terminer avec les conducteurs simples, je dirai que toutes les fois qu'on a à greffer sur les conducteurs des fils appartenant à des circuits dérivés, il ne faut jamais manquer de les souder à l'étain. Sans doute, en mettant bien à nu le métal au point d'attache, on peut rendre bonne la communication; mais les points de contact peuvent s'oxyder par la suite. Enfin, il ne faut pas perdre de vue que la plus mauvaise des soudures est préférable au meilleur des contacts.

Conducteurs des lignes télégraphiques. — Les fils que l'on emploie généralement, tant en France qu'en Angleterre et en Allemagne, pour les lignes aériennes, sont des fils de fer d'environ 4 millimètres de diamètre, recouverts d'une couche de zinc pour les rendre moins susceptibles d'oxydation. On a dû renoncer aux fils de cuivre à cause de leur allongement démesuré à l'air, de leur amincissement et de leur facilité à se rompre.

Pour isoler ces fils et éviter autant que possible les influences perturbatrices que nous avons signalées, bien des précautions ont dû être prises, et malgré l'expérience qu'on a faite des télégraphes électriques depuis bientôt 15 ans, le problème n'est encore qu'imparfaitement résolu. On a bien proposé d'enterrer ces fils en les recouvrant d'une enveloppe de gutta-percha, et ce moyen a même été adopté en Prusse pendant quelque temps; mais on n'a pas tardé à se convaincre que si ce système avait l'avantage d'empêcher les

influences perturbatrices de l'atmosphère et de mettre les fils à l'abri de la malveillance, il avait en revanche le défaut immense de rendre très-difficiles les réparations, de provoquer des réactions statiques tout à fait nuisibles et d'être infiniment plus dispendieux pour l'installation. On en est donc revenu aux lignes aériennes avec leurs poteaux, leurs isolateurs, leurs mécanismes extenseurs, et tout leur attirail matériel qui est loin d'être pittoresque.

En France, les poteaux souteneurs des fils sont des soliveaux de sapin de 6 à 9 mètres de hauteur environ, que l'on injecte de sulfate de cuivre, d'après le procédé Boucherie, pour augmenter la durée de leur conservation, et sur lesquels on fixe les plaques en porcelaine qui servent de supports aux fils. La forme de ces plaques n'est pas indifférente, car les fils n'étant pas garnis de substance isolante, l'électricité pourrait se perdre facilement en temps de pluie s'il pouvait y avoir une communication humide entre le poteau et le fil. La forme qui a été jugée la meilleure et la plus économique est celle d'une cloche portant, en guise de battant, le crochet métallique qui doit soutenir le fil. Avec cette disposition, en effet, le pied de ce crochet est toujours abrité et par conséquent à sec. (Voir fig. 17, pl. I.)

En Angleterre, chaque poteau est recouvert d'un toit et porte à son extrémité supérieure une rainure dans laquelle se trouvent fixés de doubles cônes en faïence brune, au travers desquels passent les fils de la ligne. (Fig. 18, pl. I.)

En Allemagne, les supports sont en verre à bouteilles et surmontent le poteau ; ils se terminent par une espèce de champignon à bouton également en verre, autour duquel s'entortille le fil de la ligne. (Fig. 19, pl. I.)

Les poteaux extenseurs ont un volume plus considérable que les autres, car ils doivent résister à la traction assez forte qu'on exerce sur les fils pour les tendre ; ils portent de petits mécanismes munis de roues à rochet au moyen des-

quels on assure le détirement du fil ; de petits toits abritent ces mécanismes, ainsi que les petits treuils en porcelaine sur lesquels s'enroule le fil détiré ; ou bien ces mécanismes eux-mêmes, sont montés sur des supports adaptés aux cloches en porcelaine dont nous avons parlé (voir fig. 20, pl. I). Du reste, plusieurs systèmes de mécanismes de ce genre ont été proposés et sont même brevetés. Mais comme cette question est tout à fait secondaire, à notre point de vue, nous ne nous y arrêterons pas davantage.

Il est une précaution bien simple qu'on ne prend pas ordinairement, je ne sais pourquoi, et qui offrirait pourtant des avantages nombreux, non-seulement pour les fils aériens, mais encore pour les fils recouverts de gutta-percha : c'est de *peindre* les fils avec une bonne peinture à la céruse et à l'huile. L'isolement devient beaucoup plus parfait ; l'oxydation n'est plus possible et les gerçures de la gutta-percha sont en partie évitées. J'ai souvent eu occasion d'employer ce moyen et toujours il m'a réussi.

Les conducteurs isolés destinés aux lignes souterraines ont été disposés de diverses manières : avant l'importation de la gutta-percha en 1843, par le docteur Montgomery, on les faisait passer dans des tubes métalliques que l'on plaçait dans des rainures pratiquées à l'intérieur de madriers de bois, et ces rainures étaient enduites d'un mélange de plâtre, de poudre de brique et de suif fondu ; il fallait en outre que les fils eux-mêmes fussent recouverts de coton et imprégnés d'un enduit de suif et de cire. Aujourd'hui le procédé est beaucoup plus simple, et avec d'ingénieuses machines disposées à cet effet on recouvre directement le fil lui-même de gutta-percha soufrée (dite gutta-percha vulcanisée). Lors du placement de ces fils dans les tranchées où ils doivent être enterrés, il est beaucoup de vérifications et de précautions d'isolement qu'on doit prendre ; mais je n'entrerai pas dans ces détails qui sont, d'ailleurs, faciles à

deviner; je dirai seulement qu'en cas de lésion dans le fil on peut, au moyen des formules de Ohm et de quelques coupures, connaître à quelques mètres près le point où l'électricité se perd.

Nous avons déjà dit que les conducteurs souterrains avaient présenté de tels inconvénients qu'on avait dû y renoncer, même sur les lignes où ils avaient déjà été établis. Cependant dans une ville où la longueur des circuits n'est jamais bien considérable, leur emploi peut présenter de très-grands avantages, ne serait-ce que celui de faire disparaître cette trop longue suite de supports mesquins et de fils superposés qui, comme à Paris, couronnent si désagréablement les murs des maisons et les monuments publics et qui, dans les jours d'émeute, semblent dressés exprès pour provoquer la main qui peut si facilement les détruire. Le gouvernement actuel a du reste si bien compris la nécessité de cette substitution qu'il l'a déjà commencée dans plusieurs quartiers.

Les conducteurs souterrains que l'administration a adoptés ne sont pas disposés comme ceux que nous avons décrits. Ce sont des fils de fer qui sont déposés simplement sur un lit de bitume et recouverts d'une autre couche de cette même substance; ils sont assez gros pour que la transmission du courant n'éprouve aucune résistance, et des expériences positives ont prouvé que leur isolement était suffisant.

Pour terminer avec les lignes télégraphiques, nous ajouterons que l'installation sur les mêmes poteaux de séries de fils parallèles est une véritable erreur; on ne peut alors arriver à un point donné que dans une seule direction, et si, par une cause quelconque, l'isolement dans cette direction est devenu imparfait pour l'un des fils, il est à craindre que cette même cause, l'humidité des poteaux, la présence de la neige, du givre, etc., etc., n'affecte en même temps tous les fils. C'est ce qui est effectivement arrivé souvent. Par

le système de polygones adoptés en Suisse et en Allemagne, au contraire, la communication d'un point avec un autre, ayant lieu par un grand nombre de directions et de routes différentes, il est difficile ou même impossible que l'isolement cesse à la fois sur toutes ces directions, et les correspondances ne sont jamais complètement interrompues.

CONDUCTEURS COMPLEXES.

Il est une foule d'applications de l'électricité où l'on a besoin de plusieurs conducteurs et où il devient important, si on veut les dissimuler à la vue et les rendre d'une manipulation facile, de les réunir en faisceau. Les câbles sous-marins sont des conducteurs de cette espèce. Quel est le meilleur système d'organisation de ces conducteurs? Telle est la question qui va maintenant nous occuper.

Quand il s'agit de conducteurs isolés, réunis en grand nombre et qui ne sont pas d'une grande longueur, le système le plus simple est de les entortiller dans une forte enveloppe de taffetas gommé ou de gutta-percha en feuilles et de les introduire, au moyen d'un appareil aspiratoire, dans un tube de plomb que l'on passe ensuite, ainsi muni de ses fils, dans une filière. De cette manière, le tube de plomb fait corps avec le câble, et l'on n'a pas à craindre l'usure de l'enveloppe très-friable des conducteurs, par suite de leur ballottement à l'intérieur du tube. Ce système, parfaitement exécuté par M. Herkemann, a rempli complètement mon but pour mon anémographe électrique : mais il est facile de comprendre que, pour des conducteurs très-longs, ce moyen ne serait pas applicable, car le frottement d'un câble de 50 ou 60 mètres de long contre les parois d'un tube peut être facilement vaincu, tandis qu'il n'en est plus de même quand ce câble atteint des dimensions plus considérables. Dans ce dernier cas, le seul

moyen à employer est de faire passer le câble au travers de la filière à la gutta-percha, et de le recouvrir de cette substance, comme on le ferait pour un simple fil de cuivre.

On a proposé encore, pour résoudre ce problème, de tisser avec des fils de chanvre suffisamment résistants ou même avec de la ficelle les fils conducteurs de manière à former un ruban plus ou moins large dans lequel ces fils conducteurs seraient forcément maintenus à distance les uns des autres. Ce ruban, après avoir été imprégné à plusieurs reprises de bitume liquide, serait définitivement recouvert d'une double couche de cette même substance, de manière à constituer soit une bande plus ou moins épaisse, soit un câble cylindrique plus ou moins gros. Je ne vois aucune objection à opposer à ce système, si ce n'est le prix considérable qu'entraînerait un pareil tissage. Il me semble qu'en réunissant ensemble des fils recouverts de coton et leur faisant subir la même préparation que la bande tissée, on arriverait plus économiquement au même résultat ¹.

La question des câbles électriques de petites dimensions est, comme on le voit, assez facile à résoudre, mais, quand il s'agit de les établir en grand et de les mettre à l'abri des accidents, le problème devient plus difficile et entraîne des frais considérables comme nous allons le voir.

Câbles sous-marins. — Tout le monde a entendu parler des lignes télégraphiques sous-marines et des câbles à travers lesquels passent leurs fils conducteurs. Mais ce qu'on ignore en général, c'est que c'est M. Wheatstone qui, dès l'année 1840, eut l'idée de ce système de communication électrique, et en combina tous les moyens d'exécution; toutefois la première application n'en a été faite qu'en 1849 (entre Douvres et Calais) par M. Jacob Brett. Depuis cette époque,

1. M. Baudouin, rue des Récollets, a pris un brevet d'invention pour ces sortes de câbles et pour les câbles souterrains de grandes dimensions, dont il indique le mode de construction.

plusieurs autres lignes sous-marines ont été établies. Il en existe déjà trois entre l'Angleterre et le continent : une à travers le canal de Saint-Georges , une à travers les détroits du petit Belt et du grand Belt , une dans la mer d'Irlande , une dans le Zuiderzée , une dans le golfe St-Laurent , une à travers le détroit de Sund , une à travers le Bosphore. Une autre a été placée l'hiver dernier entre Varna et Balaklava , et c'est elle qui nous a transmis quelques heures après l'événement la nouvelle des éclatants succès que nous avons obtenus en Orient. Enfin on en pose en ce moment plusieurs autres en différents points du globe dont l'une mettra la France en communication avec l'Algérie , et peut-être bientôt avec l'Égypte , les Indes et l'Australie ! Certes , comme résultat , la solution de ce problème est quelque chose d'idéal , de féérique ; penser qu'au milieu d'une tempête , alors que tous les éléments de la nature semblent déchaînés comme pour nous montrer notre impuissance , l'expression de notre pensée rapide , insaisissable comme elle , traverse tous les éléments en révolution pour aller à quelques centaines de lieues de distance révéler des faits qui vont faire peut-être le bonheur ou le malheur d'un pays , n'est-ce pas un rêve des Mille et Une Nuits ?.. Tel est pourtant le résultat des œuvres de l'intelligence de l'homme ¹.

Voici la longueur et le poids des différents câbles jusqu'à présent immergés ² et la profondeur d'eau à laquelle ils sont placés :

1. Quelques journaux ont prétendu que les communications électriques sur la ligne de Varna à Balaklava se trouvaient quelquefois troublées au moment des tempêtes. Il serait important qu'on analysât ce phénomène. Proviendrait-il d'une réaction électrique créée par les flots en mouvement sur l'enveloppe isolante du câble ? ou bien serait-il dû à des courants accidentels d'un genre tout à fait nouveau ?

2. Les longueurs que nous indiquons sont bien entendu plus grandes que les distances comprises entre les points auxquels aboutissent les extrémités des câbles.

CABLES SOUS-MARINS.	Profondeur d'eau.	Longueur.	Poids du câble.	Nombre de fils conducteurs.
Câble de Douvres à Calais.	55m	3941/2m.	175tonnes.	4
Id. de canal St-Georges.	130	103	62	1
Id. de Douvres à Ostende	55	112	504	6
Id. de Suffolk à La Haye.	"	217	846	3
Id. du Danemark à l'île Seeland.	"	26	83	3
Id. d'Écosse en Irlande.	275	40	160	6
Id. de Helder (Hollande) à Neuve-Diep.	"	8	38	6
Id. du New-Brunswick à l'île de pr. Édouard.	"	240	264	1
Id. de la Spezzia au cap Corse.	610	143	740	6
Id. de l'île de Corse à la Sardaigne.	"	19	97	6
Id. de Varna à Balaklava.	"	640	400	1
Id. de l'île de Seeland en Suède.	"	9	"	3
Id. de Sardaigne en Algérie.	2350	200	"	6

Nous empruntons aux *Nouvelles annales de construction* les renseignements intéressants qui vont suivre sur la construction de ces câbles. Ces renseignements sont dus à M. Parizot.

Tracé des lignes sous-marines. — Il est assez rare de pouvoir trouver réunies à la fois dans une même ligne toutes les conditions qui constitueraient le meilleur tracé désirable. En effet, si le tracé doit être aussi court que possible pour diminuer la dépense, il est cependant souvent nécessaire de l'allonger pour intéresser à l'entreprise un plus grand nombre d'États et pour grossir le chiffre des subventions. C'est ainsi, par exemple, que le

tracé de la *ligne de la Méditerranée* par la Corse et la Sardaigne a mérité l'appui simultané de la France et des États sardes, ce qui aurait manqué à un tracé moins coûteux établi sur les côtes de l'Italie seulement.

Une profondeur d'eau moyenne est le plus à désirer : l'immersion du câble sous de grandes hauteurs d'eau est très-dangereuse, à cause de l'énorme tension qui s'y développe, et, dans les hauts fonds, le câble est exposé au choc des vaisseaux, des ancres, des glaces et des galets, qui peuvent altérer son enveloppe préservatrice.

Enfin, la détermination des points de départ et d'arrivée exige aussi toujours des études très-approfondies. Un câble ne pourrait pas résister aux impulsions des courants et de la marée, s'il aboutissait à une côte rocheuse; les fonds sablonneux et vaseux doivent être choisis de préférence. C'est pour éviter des côtes dangereuses que le câble de *Calais à Douvres* est amarré à 6 kilomètres sur la côte anglaise, et à 6 kilomètres de Calais sur la côte française. Entre la *Sardaigne et la côte d'Algérie*, trois directions ont été successivement étudiées avant d'arriver à un choix définitif.

Composition et fabrication des câbles. — Les câbles sous-marins doivent pouvoir résister à l'action de toutes les forces auxquelles ils sont soumis. On doit cependant éviter un excès de diamètre, qui en augmentant le poids du câble, rendrait son immersion plus difficile. — Les fils conducteurs de l'électricité sont habituellement en cuivre rouge et ont un diamètre de 16 à 18 dixièmes de millimètre. — Ces fils, dont le nombre a varié jusqu'à présent entre 1 et 5, selon la multiplicité des correspondances à transmettre, sont recouverts chacun d'un enduit ou fourreau en gutta-percha épais d'environ deux millimètres, et mis en deux couches pour mieux assurer l'isolement; car si l'une des couches présentait un défaut, il est toujours probable qu'il

ne se rencontrerait point de défaut dans la partie superposée de l'autre couche. M. Newall, le grand constructeur de câbles, affirme que l'interposition d'un cheveu mouillé ou la solution de continuité produite par une piqure d'épingle suffirait pour produire l'écoulement de l'électricité hors du câble. — Les fils sont disposés suivant le pourtour d'une circonférence, et généralement tangents les uns aux autres par leurs enveloppes en gutta-percha. On a renoncé à la disposition qui avait été adoptée pour le câble d'Angleterre en Belgique, dans lequel un des fils placé au centre fut déformé par la pression exercée lors du revêtement extérieur en fil de fer. — Pour résister à cette pression, les vides extérieurs laissés entre les fils conducteurs et tout leur pourtour extérieur sont garnis d'étoupe de chanvre goudronnée sur une épaisseur variable. Cette matière contribue à l'isolement des fils et cède aux pressions sans influencer sur la forme des fils conducteurs. (Voir fig. 21, pl. I.)

Les gros fils de fer en nombre variable qui forment l'enveloppe extérieure protectrice sont enroulés hélicoïdalement, en sorte que le câble, malgré sa force, peut se plier suivant les exigences du fond de la mer, lorsqu'on l'y dépose.

Dans le câble d'Angleterre en Belgique, les 12 fils protecteurs qui forment l'enveloppe dont il s'agit peuvent résister collectivement à un effort de 40 à 50 tonnes, ce qui est généralement supérieur à la résistance des câbles ou chaînes d'amarre des vaisseaux de 1^{er} ordre.

Parfois cette enveloppe extérieure a été galvanisée, c'est-à-dire recouverte d'une couche de zinc très-mince, comme le sont les fils des télégraphes électriques terrestres; mais ce revêtement n'est pas indispensable. (Voir plus loin, *Conservation et durée des câbles*.)

Pour résister aux causes spéciales de détérioration que présente le bord de la mer, des précautions particulières ont parfois été prises. Ainsi, dans le câble de *Holyhead* à

Howth, les fils de fer sont moins nombreux mais plus forts près du rivage que dans la partie moyenne du câble. Les extrémités ont 6 fils de fer protecteurs au lieu de 12, et le diamètre total du câble est de 17 millimètres au lieu de 11. Dans un autre câble, celui d'*Angleterre en Hollande*, les trois fils conducteurs, isolément recouverts de fils de fer et déposés dans la mer à distance les uns des autres, ont été réunis et tressés en un seul câble sur une longueur de 5,600 mètres à chaque extrémité.

Le câble doit d'ailleurs, autant que possible, être d'une seule pièce dans toute sa longueur. Lorsqu'un accident force à rattacher ou à rallonger un câble, cette opération doit être faite avec le plus grand soin. Les parties sont soudées ensemble et solidement fixées par des plates-bandes de fer. Un joint fait ainsi dans le câble de Calais à Douvres a néanmoins manqué.

Pour donner au câble, en le fabriquant, toute la longueur qu'il doit avoir, il faut tenir compte, non-seulement des inégalités du fond de la mer, mais encore des allongements que peut causer la puissance des vents et des courants, qui souvent font dériver le bâtiment porteur du câble pendant l'opération très-difficile de l'immersion. Le fonctionnement du télégraphe entre Calais et Douvres a été retardé de plus d'un mois, parce que le câble s'est trouvé trop court de près de un kilomètre. Les meilleurs mois à choisir sont, selon les mers, ceux où les vents violents sont le moins à craindre, juillet et août pour la majorité des cas.

Les principaux ateliers de construction de câbles sous-marins sont en Angleterre. Les maisons W. Kuper et C^{ie}, de Londres, K. S. Newall et C^{ie}, de Gateshead sur Tyne, ont envoyé à l'Exposition universelle de l'année dernière des échantillons de tous les câbles sous-marins qui existent.

Pendant l'hiver 1852-1853, MM. Newall et C^{ie} ont fa-

briqué, sur commande, plus de 700 kilomètres de câbles télégraphiques sous-marins ou sous-fluviaux.

Transport et immersion. — Un câble sous-marin est un objet à la fois lourd et encombrant, dont le transport et la manœuvre sont difficiles et présentent souvent de véritables dangers. Lorsque, au-dessus d'une grande profondeur, ils s'échappent et se déroulent d'eux-mêmes par l'effet de leur poids, ce qui arrive alors avec une effrayante vitesse, ils peuvent ravager tout le pont du navire et tuer beaucoup de monde.

Le rouleau du câble de *Spezzia au Cap Corse*, avait 1^m 50 de hauteur, 7^m 30 de diamètre intérieur et 22^m 85 de diamètre extérieur. Il fallut 70 heures pour amarrer le câble anglo-belge dans un navire. On employa vingt wagons pour transporter des ateliers de *Gateshead à Marlyort* le câble de *Holyhead à Howth*. Le transport et l'immersion d'un de ces câbles emploie ordinairement 4 navires, dont 1 ou 2 remorqueurs à vapeur. La route à suivre pour le dépôt est indiquée par des balises flottantes, dont on cherche à s'écarter le moins possible. Pendant toute la durée de l'immersion, on maintient en correspondance des appareils mis en rapport avec les deux extrémités du câble, l'un sur le rivage du point de départ, l'autre sur le navire où git le câble à fond de cale. Si le câble se rompt, le courant est interrompu, et l'immobilité des instruments l'indique. Au sortir de la cale, le câble est reçu par deux fortes roues en fonte à gorge, sur chacune desquelles il fait trois tours pour résister à l'entraînement de la portion déjà mise à l'eau. Ces roues sont d'ailleurs pourvues de puissants freins qui modèrent au besoin leur mouvement. Le mouillage à l'eau froide des parties flottantes peut occuper jusqu'à 20 hommes. Le câble glisse à l'eau par l'avant du navire. Une troisième roue, placée à l'arrière, sert à le guider et à le maintenir dans les mouvements de roulis et de tangage.

Des compteurs avec indicateurs fixés sur les roues indiquent à chaque instant la longueur de câble immergée.

Répétons encore ici qu'il est indispensable de conduire avec beaucoup de précautions le dévidage du câble et de choisir pour cette opération le temps le plus calme possible. Le 9 octobre 1851, une tempête s'étant élevée pendant l'immersion d'un câble entre *Port-Patrick* et *Donaghadee*, on dut, pour sauver l'équipage, couper le câble et en abandonner dans la mer 25 kilomètres, qui ne furent repêchés que trois ans et huit mois plus tard. On mit quatre jours à retirer le câble de l'eau, l'impétuosité de la marée (9,600 mètres à l'heure) empêchant tout travail pendant sa descente et sa montée.

Les opérations faites pendant l'année dernière ont également eu d'assez fâcheux résultats : une partie de câble a été perdue dans l'océan Atlantique entre l'île de *Terre-Neuve* et l'île du *Prince-Édouard*; et dans la Méditerranée, le câble que l'on immergeait de *la Sardaigne à la côte d'Algérie* s'est aussi rompu dernièrement. L'opération a dû être remise à cette année. La perte est évaluée à 1 million de francs.

Conservation et durée des câbles. — On admet que, hors le cas, d'accident, un câble télégraphique sous-marin convenablement établi et soigneusement déposé dans la mer se conserve toujours en parfait état de service. L'action chimique de l'eau de mer sur les fils protecteurs paraît nulle, que ces fils soient galvanisés ou non. On attribue ce fait, soit à l'enveloppe de sable et de coquillages qui ne tarde pas à s'y déposer, soit au peu de surface absolue qu'ils présentent. Dans le cas assimilable de navires naufragés, on avait constaté de tous temps, par l'examen des pièces de fer retirées du fond de la mer, que les menus objets, tels que les armes, les clous, les outils, avaient beaucoup moins souffert que les ancres et les autres

grandes masses. Le câble d'essai de 1850, de *Calais à Douvres*, a été retiré, deux ans après, dans un parfait état de conservation, malgré la présence de hauts fonds dans cette partie de la Manche. Dans les eaux profondes, les câbles sont encore mieux en sûreté. On a retrouvé intact, après trente-deux mois de séjour dans une mer profonde, le câble abandonné le 9 octobre 1851 par M. Newall entre *Port-Patrick* et *Donaghadee*. Ce câble, remis à l'épreuve, transmettait parfaitement l'électricité sans aucune déperdition, et comme au sortir de l'atelier.

Quant aux accidents qui peuvent porter atteinte aux câbles sous-marins, ils sont dus principalement aux ancres des navires. Plusieurs câbles ont été coupés par des ancres. Le câble de Calais à Douvres a résisté à un schooner, demeuré pendant onze heures pris par son ancre jusqu'à ce que le vent ait faibli; ce bâtiment a été forcé d'abandonner son ancre et 300 brasses de chaîne, sans que le câble électrique en ait souffert. Pour obvier à ces inconvénients, les navigateurs sont invités par des avis publiés dans les journaux à ne pas jeter l'ancre dans le voisinage des câbles télégraphiques dont on leur indique la position, et qu'ils doivent tracer eux-mêmes sur leurs cartes.

Un accident qui n'est arrivé qu'une seule fois, c'est la rupture d'un câble faite de bonne foi par un marin, croyant avoir ramené avec son ancre un câble ordinaire en chanvre perdu à la mer. On a ainsi coupé 472 mètres du câble de Port-Patrick à Donaghadee.

Dernièrement M. Herkmann avait proposé un système de câble sous-marin dans lequel la gutta-percha, substance dont le prix augmente tous les jours en raison de la rareté des arbres producteurs, était en partie remplacée par du carton. Pour cela, il faisait avec cette matière des cylindres plus ou moins longs, qu'il cannelait à l'aide d'une machine et qu'il maintenait les uns au bout des autres à l'aide d'un

fil qui les traversait suivant leur axe. Les fils conducteurs se trouvaient placés dans les cannelures de ces cylindres de carton, et le tout était recouvert de gutta-percha, d'après les procédés ordinaires. Les avantages que M. Herkmann trouve à ce système seraient : 1° d'économiser la gutta-percha et de la remplacer par une substance beaucoup moins chère ; 2° de pouvoir introduire dans le câble et sans plus de dépense un très-grand nombre de fils (10 ou 12) ; 3° de rendre les réparations beaucoup plus faciles. Quant à la question de la solidité du câble elle est toujours la même que pour les câbles sous-marins existants, et ne peut être résolue que par des moyens mécaniques tout à fait en dehors de la science électrique.

III.

ORGANES ÉLECTRIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE EMPLOYÉS DANS LES APPLICATIONS MÉCANIQUES ET PHYSIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ.

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les courants pouvaient réagir extérieurement soit en provoquant un dégagement d'électricité statique, soit en attirant ou repoussant d'autres courants de source différente, soit en impressionnant suffisamment l'aiguille aimantée pour lui faire accomplir un mouvement plus ou moins prononcé. Ces trois modes de réactions extérieures des courants ne sont pas les seuls ; une hélice métallique à travers laquelle passe un courant peut, en réagissant sur une autre hélice également métallique, ou sur une substance magnétique, créer des courants d'une nature particulière qui, d'après la manière même dont ils prennent naissance, ne semblent pas soumis aux lois d'influence qui sont le propre de l'électricité sta-

tique et de l'électricité dynamique. Tantôt, en effet, c'est un courant inverse au courant inducteur qui est créé, tantôt c'est un courant direct, tantôt c'est un courant qui peut être alternativement direct ou inverse, suivant les circonstances de l'expérience. On n'a pu jusqu'à présent expliquer d'une manière complètement satisfaisante ces différents phénomènes ; mais il a été facile d'étudier les différentes conditions dans lesquelles ils peuvent se développer avec toute leur puissance. Or, comme ces sortes de réactions, par les effets mécaniques qu'elles sont susceptibles de produire à distance, se prêtent admirablement à la plupart des applications que l'on peut faire de l'électricité, ces conditions de force ou de puissance sont d'une extrême importance, à notre point de vue, et nous devons en conséquence les étudier avec le plus de soin possible.

ÉLECTRO - AIMANTS.

Des différentes réactions extérieures des courants susceptibles d'être utilisées mécaniquement, l'aimantation temporaire produite sur le fer doux par une hélice métallique à travers laquelle circule un courant, est celle qui peut être employée le plus avantageusement dans le plus grand nombre cas. L'organe électrique disposé de manière à développer cette réaction dans les meilleures conditions possibles, constitue ce que l'on appelle un électro-aimant, et la pièce de fer qui subit l'effet de l'attraction magnétique a pris le nom d'armature.

La force des électro-aimants, suivant la masse de leurs armatures, suivant la force de la pile qui les met en action, enfin suivant la grosseur et la longueur du fer enveloppé par l'hélice magnétisante, a été l'objet de nombreuses expériences de la part de MM. Jacobi, Lenz, Weber, Muller Poggendorff, Nicklès, Sir Snow Harris, etc., mais tous ces

travaux n'ont pas été faits au point de vue pratique, et n'ont fourni que peu de données applicables pour les constructeurs. Pour combler cette lacune, j'ai entrepris un grand nombre d'expériences qui non-seulement pourront donner toutes les lois des électro-aimants, mais encore indiquer au constructeur la longueur et la grosseur du fil à employer, suivant la force de la pile, la longueur du circuit, la grosseur du fer des électro-aimants, la distance de l'attraction et la manière dont est disposée la pile : de plus, par les tables qui accompagneront ce travail, on pourra reconnaître les lois de l'attraction magnétique, suivant la distance à laquelle elle s'exerce, et voir la manière dont croît ou décroît le magnétisme rémanent, suivant les différentes circonstances de l'expérience.

En attendant l'achèvement de ce travail, qui exige plus de 30,000 expériences, je vais rappeler en quelques mots les différentes déductions pratiques que l'on a pu retirer des expériences faites jusqu'ici sur les conditions de force des électro-aimants.

Conditions de force des électro-aimants. — La force des électro-aimants dépend de cinq conditions :

- 1° De l'énergie du courant électrique ;
- 2° Des dimensions et de la forme du fer magnétisé ;
- 3° De la nature de ce fer ;
- 4° De la nature de la substance servant d'enveloppe à l'électro-aimant ;
- 5° De la longueur et du diamètre du fil conducteur composant l'hélice magnétisante.

Elles peuvent se résumer ainsi qu'il suit :

1° Plus le fer d'un électro-aimant est gros, plus pour une même quantité de fil il acquiert de force. Cependant cet accroissement atteint une certaine limite et cette limite dépend de la grosseur du fil, du nombre de spires de l'hélice magnétisante et de l'énergie du courant.

2° La masse du fer est moins nécessaire au développement de l'électricité que la surface sur laquelle est enroulée l'hélice magnétisante. Ainsi on peut faire les électro-aimants creux, quand leur diamètre est assez considérable pour qu'il y ait dans cette construction économie et avantage de légèreté. Toutefois l'épaisseur du fer doit toujours être assez considérable et ne jamais être moindre que le quart du rayon du cylindre; elle doit du reste varier suivant la force électrique qui doit agir sur l'électro-aimant ¹.

3° La longueur du fer d'un électro-aimant pour une même quantité de fil n'a d'influence sensible que pour les électro-aimants droits. Ceux à deux branches ont leur force indépendante de cette longueur, du moins pour les dimensions ordinaires; s'ils sont d'une longueur et d'une brièveté démesurées il y a diminution dans la force. Ceci s'applique principalement à la force portante, car pour la force aspirante il paraîtrait que les électro-aimants à branches un peu longues auraient l'avantage ².

4° Plus les pôles d'un électro-aimant sont rapprochés l'un de l'autre plus la force magnétique se trouve neutralisée; en les écartant, au contraire, la force augmente jusqu'à une certaine limite d'écartement après laquelle elle change de ligne, et cette limite dépend de l'intensité magnétique développée. La distance moyenne que l'on peut admettre pour les électro-aimants bifurqués de dimension ordinaire peut varier entre 6 et 12 centimètres, ce qui représente la distance généralement usitée.

5° Lorsqu'on emploie des courants qui ne sont pas très-énergiques pour aimanter un électro-aimant, l'intensité magnétique développée peut être considérée *comme pro-*

1. Voir mon mémoire sur le Magnétisme statique et dynamique, page 51.

2. Voir le mémoire de M. Nicklès, Comptes rendus de l'Institut, année 1852.

portionnelle à l'intensité du courant et au nombre de tours de spires. Dès lors, l'action par influence exercée sur une armature de fer doux à distance est proportionnelle au carré de ces quantités, car le magnétisme développé dans l'armature pouvant être considéré comme égal à celui développé dans l'électro-aimant, la réaction mutuelle de ces deux influences magnétiques doit être proportionnelle au carré de la force à laquelle elles sont proportionnelles isolément. Toutefois il résulte des expériences de MM. Joule, de Haldat, Muller, Robinson, etc., que cette loi n'est vraie que quand l'électro-aimant est arrivé à son point de saturation magnétique, c'est-à-dire au point de saturation qu'il conserverait s'il était un aimant persistant. Au-dessous de ce point l'accroissement de la force magnétique varie comme la quatrième et même la cinquième puissance de l'intensité électrique. Au-dessus, cet accroissement diminue progressivement et il arrive un moment où il devient à peu près insignifiant.

Du reste les lois de cet accroissement varient encore suivant la résistance et la longueur du circuit. Quand l'hélice est courte et composée de gros fil, la limite maximum est atteinte promptement. Quand, au contraire, l'hélice est très-longue et composée de fil fin, cette limite est considérablement reculée.

6° Il résulte de cette loi qu'un électro-aimant produit le maximum d'effet dont il est susceptible quand son fil oppose à la circulation du courant une résistance égale à celle que celui-ci éprouve dans le fil du circuit et dans la pile¹. En

1. M. Muller pose de la manière suivante les lois des électro-aimants :

Dans les barreaux de fer des électro-aimants, chaque molécule possède un maximum magnétique croissant proportionnellement au carré des diamètres du barreau.

Pour développer dans des barreaux de fer de différentes sections la même partie aliquote de leur maximum magnétique, il faut employer des cou-

effet, en admettant que R représente la résistance du circuit et celle de la pile, que E soit le pouvoir électro-moteur et r la résistance du fil de l'électro-aimant, l'intensité du courant,

d'après les lois de Ohm, sera $I = \frac{n E}{R + r}$. Or, comme l'ac-

tion exercée par l'électro-aimant sur l'armature en fer doux est proportionnelle au carré de cette intensité ¹, elle l'est également à la longueur du fil enroulé r . La force aimantante pourra donc être représentée par la formule

$$F = \frac{n^2 E^2 r}{(R + r)^2}$$

Or, il est facile de voir que l'expression F est susceptible d'un maximum lorsque r varie ; en effet, la différentielle,

par rapport à r , est $\frac{n^2 E^2 (R - r)}{(R + r)^3}$, et pour que cette expression soit zéro, il faut que $R = r$.

Comme on peut faire varier la résistance d'un circuit ou d'une portion de circuit par la grosseur et la longueur du fil conducteur, on peut arriver facilement à obtenir cet équilibre de résistance ².

7° On peut encore conclure de ce qui précède que la grosseur et la longueur du fil des électro-aimants doivent

raints dont les intensités seront entre elles comme les racines carrées des cubes des rayons.

Dans les limites entre lesquelles la puissance magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant, la puissance magnétique développée par des intensités électriques égales dans des barreaux variables de diamètre, est proportionnelle à la racine carrée des diamètres.

¹ Voir l'ouvrage de MM. Becquerel.

² Voir le mémoire de M. Glaesner dans les mémoires de l'Académie de Liège.

également dépendre de la nature des piles. En effet, si la pile que l'on emploie présente peu de résistance intérieure et fournit beaucoup d'électricité, comme les piles de Grove, de Bunsen, de Smée, etc., on devra employer du gros fil pour les électro-aimants qui seront soumis à son action, et l'hélice magnétisante devra être courte. Si, au contraire, la pile ayant une grande résistance intérieure fournit l'électricité en petite quantité, mais avec une certaine tension, comme les piles de Daniell et les piles à sable de petites dimensions, le fil des électro-aimants devra être fin et long. Du reste, cette grosseur et cette longueur de ces fils devra être subordonnée, comme nous l'avons dit précédemment, au nombre des éléments de pile employés et à la longueur du circuit. Avec une pile Bunsen d'un élément la grosseur la plus convenable est de 2 ou 3 millimètres pour des électro-aimants de moyenne taille. Cette grosseur peut être augmentée pour de gros électro-aimants jusqu'à 5 millimètres, mais elle ne doit pas être moindre qu'un millimètre $1/2$, quel que soit d'ailleurs le nombre d'éléments de pile employés, car le fil finirait par trop s'échauffer. — Avec une pile de Daniell d'un élément la grosseur maximum du fil ne doit pas dépasser 1 millimètre, car il ne faut pas perdre de vue que, dans ce cas, l'hélice magnétisante doit être d'une plus grande longueur qu'avec les piles de Bunsen ; mais cette grosseur doit diminuer considérablement avec le nombre des éléments employés. Pour une pile de huit éléments le n° 16 du commerce est celui qui convient le mieux. — Bien entendu, dans ce que je viens de dire, je fais abstraction de la longueur du circuit que je suppose nulle ou à peu près, et je ne parle qu'en vue des piles seulement.

8° Considérées par rapport aux électro-aimants en eux-mêmes, la grosseur et la longueur du fil qui les recouvre dépend essentiellement de leur grosseur et de leur nombre.

On conçoit en effet que chacun de ces électro-aimants ayant besoin d'une quantité donnée d'électricité pour être aimanté à saturation, et cette quantité d'électricité pouvant être donnée soit par l'augmentation de la pile, soit par la grosseur du fil ou sa brièveté, on se trouve avoir à combiner ces trois questions ensemble. Or, les électro-aimants, par leurs plus ou moins grandes dimensions, donnant aux spires de l'hélice magnétisante un plus ou moins grand développement, une longueur donnée de fil qui sera en rapport avec la pile que l'on emploie, et qui sera suffisante pour saturer un électro-aimant de moyenne grandeur, ne le sera plus pour un très-gros électro-aimant, ou sera trop grande pour un très-petit. Il faudra donc, dans le premier cas, allonger le circuit, et, dans le second cas, le raccourcir. Mais pour que l'équilibre avec le circuit et la résistance de la pile, qui a été calculé et qui est représenté par une longueur donnée de fil, subsiste, il faut que ce rallongement ou ce raccourcissement soient compensés par l'augmentation de la grosseur de fil dans un cas, et par la diminution de sa grosseur dans l'autre. Il en est de même quand deux ou plusieurs électro-aimants sont interposés dans un même circuit ¹.

9° Toutes ces conditions de force des électro-aimants que nous venons de passer en revue, nos 5, 6, 7, sont solidaires les unes des autres. En effet, si l'hélice magnétisante n'est pas assez longue pour la grosseur de son fil et le diamètre des électro-aimants, on perd de la force qu'on aurait pu gagner; si au contraire l'hélice magnétisante est trop longue pour la grosseur de son fil et le diamètre des électro-aimants, on perd de la force par l'affaiblissement du courant qui se fait alors en pure perte. D'un autre côté, si tel système d'électro-aimant a été calculé pour une pile d'un certain nombre d'éléments, on ne gagne pas la force qu'on

1. Voir mon Mémoire sur les électro-moteurs.

pourrait obtenir d'un renforcement fait à la pile, et on en perd par la trop grande résistance qu'on oppose au courant quand on diminue la pile; enfin, si un électro-aimant enroulé de fil excessivement fin (parce que le circuit de la ligne est assez long pour nécessiter cette grande résistance de bobine) est interposé dans un circuit très-court on se trouve perdre de la force par l'affaiblissement inutile du courant, ou si le contraire a lieu on en perd parce que l'équilibre entre la résistance de la bobine et la résistance du circuit n'est pas établi.

10° En outre de ces considérations on doit encore, dans le choix de la grosseur et de la longueur du fil des bobines magnétisantes, avoir égard à la composition du circuit et à l'affaiblissement d'action magnétique dû à l'éloignement successif des spires de l'hélice inductrice. Si le circuit présente des dérivations dans lesquelles se trouvent interposés des électro-aimants, il faudra pour que ces électro-aimants puissent fonctionner en même temps, que les résistances qu'ils opposeront au courant issu de la pile soient égales. Par conséquent l'électro-aimant qui sera le plus près de la pile devra avoir son fil plus fin et plus long que celui qui sera le plus éloigné ¹.

11° Celles des réactions statiques des aimants qui sont indépendantes des effets d'attraction que l'on veut produire, étant nuisibles à ces effets puisqu'elles paralysent, comme je l'ai démontré, la circulation du courant magnétique, devront être soigneusement évitées. Par conséquent le fil qu'on devra employer pour l'hélice devra toujours être de métal non magnétique, ainsi que les bobines sur lesquelles ce fil est enroulé. Les corps magnétiques étrangers aux effets que l'on veut produire devront, par la même raison

1. Voir mon *Mémoire sur les réactions magnétiques des courants*, dans les *Mémoires de la Société des Sciences naturelles de Cherbourg*, 1^{er} vol.

être éloignés le plus possible de l'électro-aimant, si on ne peut les éviter dans la construction des appareils ¹.

12° La circulation du courant dans l'hélice d'un électro-aimant faisant subir aux molécules du fer une espèce de trempe magnétique qui provoque entre elles une série de réactions statiques, il arrive qu'un électro-aimant qui a été excité par une force électrique supérieure à celle qui doit être employée à l'état normal, perd de la force qu'il aurait eue sans cet essai préalable. C'est par la même raison qu'un électro-aimant qui n'a pas encore servi est plus énergique la première fois qu'on le fait agir que les autres fois, quoique la force employée ait été toujours la même ². La conclusion de ce principe est donc qu'il ne faut jamais essayer un électro-aimant avec une force électrique supérieure à celle qui doit être employée.

13° La nature du fer influe considérablement sur les électro-aimants, principalement sous le rapport du magnétisme rémanent, c'est-à-dire de la persistance de l'action magnétique alors que le courant électrique a cessé d'agir. Cette réaction, nuisible aux effets mécaniques que les électro-aimants sont appelés à produire, peut être en partie évitée par la purification du fer et son recuit. Les fers que l'on vend dans le commerce ne sont pas en effet très-purs, ils contiennent une foule de matières étrangères qu'il s'agit d'éliminer; mais c'est là précisément le point difficile, car il faudrait pour cela réagir sur ce métal dans son état de fusion. On a conseillé de fabriquer des fers de toutes pièces avec des fils de fer réunis en faisceau et purifiés à la température du rouge-blanc dans un bain d'eau de chaux; mais ces fers ainsi préparés n'ont pas donné tout ce que l'on en

1. Voir mon Mémoire sur les Effets statiques et dynamiques des aimants. Mémoire de la Société impériale des Sciences naturelles de Cherbourg, 1^{er} vol. page 152.

2. Voir mon Mémoire sur ce sujet. Même ouvrage, page 121.

attendait. Jusqu'à présent M. Froment est le seul qui ait à peu près résolu le problème, mais il n'a pas encore fait connaître ses procédés. Quoi qu'il en soit, il est essentiel, avant de se servir d'un électro-aimant, de le faire recuire plusieurs fois et de le faire refroidir à chaque fois à une température très-douce.

14° Quelque parfait que soit un électro-aimant la condensation mutuelle des fluides magnétiques qui s'est faite des deux côtés de la surface de contact avec son armature, empêche toujours le détachement instantané de cette armature. Pour diminuer cet effet il importe d'empêcher le contact des deux corps magnétiques, et c'est à quoi l'on parvient soit en introduisant sur les pôles de l'électro-aimant une petite cheville de cuivre ou d'ivoire, soit en adaptant à l'armature de cet électro-aimant une vis de rappel. Ce dernier moyen est préférable, car le magnétisme rémanent croissant avec la force électrique dans un rapport plus grand que cette force, il est important de pouvoir régler l'écartement des armatures comme on règle la force du ressort antagoniste quand on veut profiter de toute la force des électro-aimants ¹.

15° Lorsqu'on emploie un faisceau de fils de fer doux au lieu d'un cylindre massif de ce métal, on a remarqué que la désaimantation est plus rapide. Cela tient probablement à un effet d'induction. Mais comme le poids porté, toutes choses égales d'ailleurs, est plus grand avec un barreau plein qu'avec l'autre, et celui-ci étant d'ailleurs plus facile à fabriquer, on préfère l'emploi de ce dernier.

16° D'après MM. Becquerel l'enveloppe qui entoure le fer d'un électro-aimant et sur laquelle est enroulée l'hélice magnétisante, a une influence sur la rapidité des aimantations et des désaimantations, mais non sur le poids porté

1. M. Paul Garnier a fait à ce sujet des expériences très-curieuses.

ou sur l'intensité magnétique développée. Ainsi, une enveloppe en cuivre ou en métal bon conducteur diminue le nombre d'aimantations que l'on peut obtenir dans un temps donné, et cela à cause des effets d'induction qui ont lieu ; aussi dans les appareils où l'on veut produire un grand nombre d'alternatives d'aimantation, doit-on employer des enveloppes en ivoire, en bois, en carton, ou en tout autre corps non conducteur.

17° En outre des conditions précédentes, la force des électro-aimants varie avec la masse de leur armature et la manière dont celle-ci est exposée à l'action inductive ¹. Dans le premier cas, elle croît avec la masse de l'armature jusqu'à une certaine limite qui est au-dessous de celle du fer de l'électro-aimant. Dans le second, elle se trouve sensiblement augmentée quand l'armature est posée de champ. M. Liais, à qui j'avais communiqué ces résultats, a fait des recherches pour apprécier mathématiquement les lois de cet accroissement de force et il est arrivé à conclure que, pour des armatures de même longueur, les poids supportés croissent comme la racine cubique de la surface exposée à l'induction (la troisième dimension de l'armature restant constante), tandis qu'ils croissent comme la racine carrée de cette troisième dimension, si on la fait varier en rendant constante la surface exposée à l'induction. Cela se conçoit d'ailleurs si l'on examine que, quand les armatures sont posées de champ, les deux surfaces les plus larges sont exposées à l'induction, tandis qu'il n'y en a qu'une quand l'armature est posée à plat.

18° L'action des électro-aimants sur le fer ne se manifeste pas seulement au contact, elle s'exerce encore à distance à travers même les corps les plus durs. Mais leur énergie

1. Voir mes expériences à ce sujet dans mon mémoire sur les électromoteurs.

diminue dans un rapport considérable avec cette distance. On avait supposé que cette décroissance était dans le rapport du carré de la distance, mais c'est une erreur. Dans le premier instant de la séparation du fer de son point de contact avec l'aimant, cette décroissance dépasse peut-être la troisième puissance de la distance, puis peu à peu cette progression s'affaiblit, et le rapport finit par être proportionnel à la simple distance.

19° L'action attractive d'un électro-aimant a toujours pour effet de faire coïncider la ligne médiane de l'armature avec sa ligne axiale propre. Il en résulte qu'en présentant de côté une armature à un électro-aimant, cette armature se trouve non-seulement attirée de la quantité dont on l'aura éloignée des bords de l'électro-aimant, mais qu'elle continue encore d'être attirée jusqu'à ce que sa ligne médiane vienne coïncider avec la ligne axiale de l'électro-aimant. On gagne à cette disposition une course considérable pour l'armature, course qu'on peut rendre aussi grande que l'on veut en augmentant la surface des pôles de l'électro-aimant et la largeur des armatures.

20. L'électricité statique réagit infiniment moins énergiquement que les courants voltaïques sur les corps magnétiques. C'est tout au plus si on peut aimanter par ce moyen des aiguilles assez fines; encore faut-il procéder par décharges et non par courant continu. Il est probable que la faiblesse de ces réactions magnétiques de l'électricité statique vient de son excès de tension. Les courants d'induction de très-grande tension, comme ceux qui proviennent de la machine de Ruhmkorff, sont dans le même cas. Du reste, il existe dans ces phénomènes des effets tellement bizarres, qu'il est bien difficile non-seulement de les expliquer, mais même de les analyser. Ainsi l'aimantation produite par une décharge d'électricité statique peut donner lieu à un courant magnétique dirigé dans un sens

ou dans l'autre, suivant la distance à laquelle l'aiguille est placée du conducteur à travers lequel s'effectue la décharge.

DIFFÉRENTES FORMES DES ÉLECTRO-AIMANTS.

Les électro-aimants peuvent se diviser en deux grandes catégories : les électro-aimants *droits* et les électro-aimants *recourbés*.

La forme la plus simple des premiers est un cylindre de fer sur lequel on a enroulé le fil métallique isolé à travers lequel doit circuler le courant, et qui constitue ce que l'on appelle *l'hélice magnétisante*.

Les seconds réduits à leur plus simple expression ne sont autre chose que les premiers que l'on a recourbés en fer à cheval, et qui présentent par conséquent leurs deux pôles d'un même côté.

Si l'on se pénètre de cette simple origine de tous les électro-aimants quels qu'ils soient, on pourra comprendre que les dénominations *ligne axiale des électro-aimants*, *ligne équatoriale*, appropriées, la première à la ligne des deux pôles, la seconde à celle qui lui est perpendiculaire (par analogie avec le globe terrestre considéré comme aimant), pourront être appliquées à tous les électro-aimants pour désigner une direction par rapport à eux.

ÉLECTRO-AIMANTS DROITS.

Les électro-aimants droits dans leur forme primitive peuvent, comme on le comprend aisément, être cylindriques, carrés, plats, ellipsoïdiques, etc., etc., et avoir toujours les mêmes propriétés. Ils pourront encore être revêtus d'une bobine de cuivre ou de bois sur laquelle sera enroulée l'hélice, ou porter deux viroles à leurs extrémités, afin de maintenir les spires de cette hélice, qui sera directement

enroulée sur eux, sans que les conditions d'aimantation que nous avons énumérées soient changées. De plus, leurs pôles se reportant toujours aux deux extrémités du plus grand diamètre du fer, les bouts de ceux-ci pourront excéder ou affleurer les extrémités de l'hélice ou bien encore rentrer au dedans de cette hélice; ils pourront être taillés rectangulairement ou en biseau, en creux ou en pointe, etc.; enfin ils pourront être déviés de la ligne axiale et contournés sans que les conditions magnétiques changent.

La forme en biseau est particulièrement affectée aux électro-aimants employés pour l'aimantation des barreaux aimantés par le procédé de la double tonche. La manipulation en est beaucoup plus facile. (Voir fig. 2, pl. II.)

La forme en pointe est destinée aux électro-aimants d'expérimentation qui doivent produire une action polaire concentrée. (Voir fig. 5.)

Au contraire, la forme creuse disperse l'action polaire et l'étend sur une plus grande surface. Il en est de même des électro-aimants dont les extrémités sont garnies de rondelles de fer. (Voir fig. 3 et 4.)

Il va sans dire que toutes ces formes peuvent également se prêter à la disposition des électro-aimants sur les appareils. Ainsi dans les électro-moteurs à mouvement direct où plusieurs électro-aimants sont étagés parallèlement les uns au-dessus des autres aux deux extrémités diamétrales de la roue portant les armatures, les extrémités polaires de ces électro-aimants devront être taillées de manière à correspondre à la circonférence de la roue.

La fig. 6 est la forme qui a été adoptée par M. Bonelli, pour ses métiers à la Jacquart électro-magnétiques. Elle a l'avantage que l'armature, entrant dans la bobine, devient elle-même un aimant et se trouve attirée avec plus de force. D'un autre côté, il s'ajoute à cette action celle des courants parallèles, qui est déjà par elle-même très-

efficace, puisque j'ai pu faire fonctionner un moteur en l'employant uniquement. C'est donc dans une attraction ordinaire à effet simple la disposition la plus avantageuse. Il va sans dire qu'on peut l'appliquer avec autant d'avantages aux électro-aimants doubles. (Voir fig. 23.)

La fig. 7 représente un électro-aimant dont les extrémités sont taillées en palette et ressortent considérablement de l'hélice magnétisante. Il peut servir d'armature dans les appareils à électro-aimants recourbés dont l'armature doit être *fortement aimantée*. Employé dans ce but, il offre des avantages incontestables sur les électro-aimants à deux branches, car il est beaucoup plus léger et occupe beaucoup moins de place.

Souvent, dans les électro-aimants droits qui servent au développement de l'électricité d'induction, on emploie à la place du cylindre de fer un faisceau de fils du même métal réunis à leurs extrémités par des viroles de fer doux. Sans doute la force magnétique de pareils électro-aimants est moins grande que celle des cylindres d'une seule pièce, mais ils ont l'avantage de réagir beaucoup plus énergiquement par induction. La machine de Ruhmkorff offre un exemple de l'emploi de ces sortes d'électro-aimants. Pour la même raison on emploie des cylindres de fer-blanc dans les appareils à commotions.

ÉLECTRO-AIMANTS RECOURBÉS.

L'hélice que porte l'électro-aimant droit peut être divisée en deux, sans que son action magnétisante en soit altérée. Il en résulte donc qu'en recourbant préalablement un cylindre de fer et en adaptant à ses deux extrémités deux hélices *enroulées dans le même sens*, l'une par rapport à l'autre, on aura un électro-aimant à deux branches qui ne sera pourtant qu'un électro-aimant semblable aux précédents, mais qui aura été recourbé. (Voir fig. 8.)

On conçoit qu'en remplaçant le cylindre de fer recourbe par deux cylindres de fer réunis rectangulairement par une traverse du même métal, on doit obtenir le même effet, puisque l'ensemble de ces pièces par leur contact présente les mêmes conditions magnétiques que si le fer était d'un seul morceau. Pourtant l'expérience prouve que ce genre d'électro-aimants est moins fort que les électro-aimants en fer à cheval d'une seule pièce. Ils ont en revanche l'avantage d'être d'un ajustement plus facile et d'une disposition plus commode dans les différents appareils où ils doivent entrer. Aussi sont-ils toujours préférés et n'emploie-t-on les électro-aimants en fer à cheval que dans les expériences qui nécessitent une force considérable.

La fig. 9 représente un électro-aimant de ce genre dont les deux branches portent des bobines de cuivre sur lesquelles sont enroulées les hélices magnétisantes. Ces bobines se terminent par deux rondelles destinées à arrêter le fil; mais du côté de la traverse de fer, le canon de la bobine dépasse la rondelle de manière à laisser vide un petit espace par lequel sortent les deux extrémités du fil de l'hélice. C'est par deux trous pratiqués dans la rondelle inférieure que passent ces deux bouts du fil; mais il faut avoir soin de recouvrir le fil en ces endroits de matière isolante soit de gutta-percha chauffée, soit de toile cirée, etc., afin qu'il n'y ait point contact entre lui et le cuivre de la bobine, ce qui entraînerait une déperdition considérable du courant.

La communication des deux hélices peut se faire soit directement de l'une à l'autre par les deux extrémités correspondantes de chaque hélice, soit par le fer de l'électro-aimant lui-même. Dans ce dernier cas, une des extrémités de chaque hélice est soudée ou rivée sur le canon de la bobine, tandis que les deux autres bouts sont en rapport avec le circuit; mais ce genre de communica-

tion exige une plus grande perfection dans l'isolement du fil, de sorte qu'en général l'autre moyen est préférable.

Les bobines de cuivre, disposées comme nous venons de le dire sur les électro-aimants, ont cela d'agréable qu'il suffit de les assujettir sur un rouet pour les enrouler, tandis que, quand le fil doit être enroulé directement sur le fer avec deux rondelles de retien, il faut que les branches de fer de l'électro-aimant puissent être dévissées à volonté de dessus leur traverse commune, ce qui est une difficulté dans la pratique. Pourtant l'électro-aimant gagne de la force à cette disposition. Quelques constructeurs, pour obtenir avec les bobines les avantages fournis par ce dernier système, pratiquent dans le canon de ces bobines de grandes rainures longitudinales.

Du reste, qu'on se serve ou non de bobines, il est bon que les pôles de l'électro-aimant ressortent un peu des rondelles supérieures.

La fig. 10 montre un électro-aimant dont l'hélice est enroulée directement sur le fer sans rondelles de retien; alors les différents rangs des spires se superposent en rétrogradant de manière à former deux cônes tronqués opposés par leur base. Ces sortes d'électro-aimants sont particulièrement employés dans les machines de Clarke pour favoriser les effets de l'induction.

La fig. 12 est la représentation d'un électro-aimant à branches creuses et à rondelles de fer. Le fil est enroulé entre la traverse commune et la rondelle qui forme l'épanouissement des pôles. Ces électro-aimants présentant un large diamètre de pôles sont surtout favorables à l'attraction équatoriale, lorsque celle-ci doit s'exercer sur des armatures larges dont la ligne médiane peut coïncider avec la ligne axiale de l'électro-aimant. Je les ai employés pour un électro-moteur construit sur ce principe, et, comme leurs pôles avaient 16 centimètres de diamètre et que les

armatures en avaient 10, j'obtenais une course attractive de 14 centimètres.

Il arrive souvent (dans certains genres de compteurs par exemple) qu'on est dans la nécessité d'employer comme support d'un mécanisme sur lequel l'électro-aimant doit réagir, l'une des deux branches de cet électro-aimant. Celui-ci ne possède alors qu'une seule bobine : eh bien ! chose assez extraordinaire en apparence, la déperdition de force qu'il subit est peu sensible. Sans doute l'action du pôle sans bobine est moins énergique que celle de l'autre, en la prenant isolément ; mais, par rapport à l'armature qui leur est commune, l'effet attractif ne perd pas beaucoup, surtout quand le fil est fin. J'ai fait construire des électro-aimants de ce genre dans mon anémographe électrique ; la fig. 11 en est la représentation.

En rapprochant très-près l'une de l'autre les deux branches d'un pareil électro-aimant, et en recourbant la branche libre, comme l'indique la fig. 13, on peut obtenir l'un à côté de l'autre les deux pôles de l'électro-aimant et faire réagir par conséquent ces deux pôles à la fois sur une armature prise en bout et de très-minime étendue. Ce moyen a été employé par M. Bonelli dans ses métiers de tissage électro-magnétiques.

Une disposition analogue et prise dans le même but a été adoptée par M. Morse pour les électro-aimants à deux bobines de son télégraphe, seulement les branches de cet électro-aimant sont toutes les deux recourbées. (Voir la fig. 17.)

Si l'on suppose soudée à la rondelle de fer d'un électro-aimant droit une chemise cylindrique de fer doux, qui enveloppera la bobine, on concevra que ce cylindre partageant le magnétisme de la rondelle présentera un pôle de même nom à son extrémité libre ; on aura donc ainsi à l'une des extrémités de l'électro-aimant un pôle circulaire au

centre duquel se trouvera l'autre pôle. Un pareil système peut donc être employé concurremment avec les deux précédents pour l'attraction des armatures se présentant en bout. (Voir fig. 15.) Il en sera de même de l'électro-aimant à trois pôles, représenté, fig. 14, et qui peut être considéré comme une fraction du précédent. MM. Fabre et Kunemann, qui construisent leurs électro-aimants de cette manière (avec la chemise de fer), prétendent qu'ils ont une grande supériorité de force sur les autres; ils les appellent *électro-aimants tubulaires*. M. Roux a aussi employé dans son grand électro-moteur des électro-aimants de ce genre. Seulement les pôles sont oblongs au lieu d'être circulaires. (Voir fig. 21.)

Si l'on adapte à un électro-aimant droit qui sera creux et à rondelles de fer, comme celui de la fig. 4, deux chemises cylindriques de fer doux, laissant entre elles, vers le milieu de l'électro-aimant, une petite rainure vide, on obtiendra un électro-aimant circulaire ayant un pôle différent sur chacune des deux chemises de fer qui le recouvrent, et agissant par conséquent par ses deux pôles à la fois sur une armature longitudinale ou circulaire sur laquelle il sera appuyé. De plus, en faisant traverser l'axe creux de cet électro-aimant par un axe quelconque non magnétique, on en fait une véritable roue parfaitement aimantée, qui peut exercer une grande force d'adhérence sur un barreau de fer ou un rail sur lequel on la ferait rouler. Ce système avait été proposé par M. Nicklès pour l'aimantation des roues des locomotives sur les chemins de fer, et comme électro-transmetteur de mouvement pour suppléer les engrenages. (Voir fig. 16 et 28.)

En recourbant à angle droit la traverse sur laquelle sont fixées les deux branches d'un électro-aimant recourbé, on peut faire en sorte de placer l'un vis-à-vis de l'autre, comme dans la fig. 18, les deux pôles contraires. De plus, en cou-

pant cette traverse en deux, et faisant glisser les deux parties libres dans une coulisse pratiquée sur une planche de fer doux, on peut régler à volonté l'écart de ces deux pôles. Tel est l'appareil de Faraday, à l'aide duquel on peut étudier les phénomènes du diamagnétisme et de la polarisation de la lumière sous l'influence du magnétisme.

Quand on veut faire osciller une armature entre les deux pôles d'un électro-aimant, ce qui suppose généralement l'emploi d'armatures aimantées, trois moyens peuvent être employés : ou les pôles de l'électro-aimant ressortant des bobines se recourbent parallèlement à la ligne axiale et se présentent l'un vis-à-vis de l'autre à une distance aussi petite qu'on le veut ; ou les deux branches sont suffisamment rapprochées pour que l'oscillation puisse se faire dans le sens équatorial entre ces branches ; ou enfin les branches de l'électro-aimant sont elles-mêmes inclinées pour que les pôles soient plus rapprochés l'un de l'autre. Ce dernier système a été employé par M. Breguet dans ses télégraphes silencieux ; il a l'avantage sur les autres de ne pas exiger un trop grand allongement des branches, ce qui nuit toujours un peu à la force développée, et d'exercer sur l'armature une attraction directe qui est toujours plus puissante que l'attraction latérale. La fig. 20 représente ce système. Nous parlerons prochainement d'une autre combinaison pour des attractions de ce genre qui doivent s'effectuer à une distance plus grande, et sans qu'il y ait d'effet mécanique à produire.

M. Siemens, de Berlin, cherchant à détruire, autant que possible, le magnétisme rémanant dans ses fers d'électro-aimants, a construit leurs branches de forme ovoïde, et a pratiqué, dans chacune d'elles, des fentes longitudinales destinées, suivant lui, à couper le courant magnétique. Je ne sais jusqu'à quel point ce moyen lui a réussi ; mais ce qui est certain, c'est que les électro-aimants simples, de

M. Froment, sont infiniment meilleurs; puisque ses appareils marchent avec une précision et une vitesse que jamais n'ont eues les appareils de M. Siemens.

Les électro-aimants à pôles multiples, représentés fig. 19, ont été employés souvent par M. Froment dans ses grands électro-moteurs; ils consistent dans une barre de fer portant 8, 10, 12, etc., cylindres de fer sur lesquels sont adaptées les hélices magnétisantes. La distribution du magnétisme s'y fait d'une manière particulière: les branches paires ont toutes le même pôle, et les branches impaires possèdent l'autre pôle; il en résulte que l'un quelconque de ces pôles se trouve toujours entre deux pôles de même nom, comme dans les électro-aimants à trois pôles dont nous avons parlé. Ces sortes d'électro-aimants ont une grande force et ont l'avantage de réagir sur une très-grande longueur d'armature. Ils sont donc précieux pour les électro-moteurs.

On a cherché aussi à aimanter de plusieurs manières des plaques de fer, de façon à en faire des électro-aimants. Ainsi M. Joule s'est imaginé de recourber en cylindre une plaque de tôle, comme on le voit, fig. 22, et d'en redresser les deux côtés (ceux en regard l'un de l'autre) de manière à permettre l'application d'une armature. Il lui a suffi alors d'enrouler le fil dans le sens de la longueur du cylindre, pour construire un électro-aimant à deux branches présentant ses deux pôles sur les tranches redressées de la plaque.

En cannelant une plaque de fer, c'est-à-dire en pratiquant sur toute sa surface une série de rainures assez profondes, et en introduisant dans ces rainures un fil métallique isolé se repliant sur lui-même de manière à contourner tous les reliefs des cannelures, M. Pulvermacher a pu faire des électro-aimants à pôles multiples comme ceux de M. Froment. Ces pôles se trouvent répartis sur les reliefs des cannelures de telle manière qu'un

pôle sud se trouve toujours entre deux pôles nord et réciproquement. (Voir la fig. 23.) Avec un seul fil, ces électro-aimants n'ont pas une grande puissance, mais comme ils prennent très-peu de place, on peut les multiplier considérablement. En faisant les cannelures plus grandes et les reliefs plus épais, on pourrait aussi faire revenir un grand nombre de fois le fil sur lui-même et multiplier ainsi l'effet magnétique.

Parmi les dispositions différentes que M. Pulver Macher a indiquées pour la construction de ces sortes d'électro-aimants, il en est une qu'il recommande spécialement comme donnant une grande force magnétique. C'est de composer la plaque de fer elle-même avec des bandes de tôle (de 1 millimètre d'épaisseur) juxtaposées les unes à côté des autres, et séparées entre elles par des feuilles de papier de l'épaisseur d'une carte à jouer. Cette pile de plaques étant fortement serrée dans un cadre de cuivre, et présentant des reliefs (entre les cannelures) de 6 millimètres environ, fournit, d'après M. Pulver Macher, un excellent électro-aimant, bien qu'un seul conducteur de 3 millimètres environ de diamètre circule à travers les cannelures.

DES ARMATURES.

1° *Disposition des armatures.* Les armatures des électro-aimants, soit barreaux aimantés, soit aimants temporaires, ou simplement palettes de fer doux, peuvent être disposées, par rapport aux électro-aimants qui doivent avoir action sur elles, de plusieurs manières : articulées sur les deux bobines des électro-aimants ou dans leur voisinage, comme dans la fig. 33, le mouvement décrit par elles s'effectue parallèlement à la ligne axiale des électro-aimants, mais perpendiculairement à la ligne équatoriale, par conséquent l'action des deux pôles sur le fer est égale de part et

d'autre ; articulées par l'une de leurs extrémités , comme dans la fig. 33 bis , le mouvement s'effectue angulairement par rapport à la ligne axiale et , par conséquent , l'action des deux pôles sur le fer est inégale , mais très-efficace puisque l'un des pôles agit presque au contact ; enfin , articulées entre les pôles de l'électro-aimant par l'intermédiaire d'un pivot parallèle aux branches de celui-ci , comme dans la fig. 36 , leur mouvement est basculant dans le sens équatorial ; par conséquent , l'action attractive est latérale . Ce système a été employé par M. Siemens dans son télégraphe électrique à mouvement synchrone.

Ces différents systèmes de disposition de l'armature que nous venons de passer en revue s'appliquent seulement à l'action directe , soit normale , soit latérale , des électro-aimants ; mais quand on veut exercer la force de ceux-ci à l'égard de leurs armatures par l'intermédiaire des réactions réciproques des résultantes magnétiques , la disposition des armatures doit être un peu différente et peut être modifiée de trois manières . 1° On peut les disposer à plat par rapport aux pôles des électro-aimants en les fixant à l'extrémité d'un levier articulé en dehors de l'électro-aimant et se mouvant dans le sens de la ligne équatoriale perpendiculairement à la ligne axiale . L'armature étant alors placée à un millimètre environ des bords polaires de l'électro-aimant se trouve entraînée au-dessus des pôles de celui-ci jusqu'à ce que sa ligne médiane coïncide avec la ligne axiale de l'électro-aimant . C'est , comme je l'ai déjà dit , le moyen d'obtenir une très-grande course de la part des armatures ; mais quand on emploie une grande force électrique , on court risque de faire ployer les supports , car cette action attractive s'opère sous l'influence même de l'attraction normale qui est la plus forte . La fig. 37 représente cette disposition . La seconde manière de disposer les armatures pour obtenir la même réaction magnétique est de les faire basculer dans le plan de la ligne

axiale au-dessus des pôles de l'électro-aimant dont on a épanoui les bords au moyen d'une rondelle de fer doux, comme on le voit dans la fig. 36. Enfin le troisième système de disposition des armatures dans le cas qui nous occupe est de faire basculer l'armature entre les pôles de l'électro-aimant dont les bords auront été également épanouis et qu'on aura échancrés de manière à ce que l'armature puisse pivoter librement tout en subissant l'action magnétique sur l'étendue de près d'une demi-circonférence. (Voir la fig. 38). Ce dernier système est évidemment le meilleur, car la force normale des pôles de l'électro-aimant qui est en dehors de l'action que l'on cherche à obtenir, réagit dans ce cas aux deux extrémités de l'armature et dans un sens contraire. Elle n'exerce donc pas d'effet nuisible ni sur le système du pivotage ni sur la flexion de l'armature ou des pièces qui la supportent, comme cela arrive dans les deux systèmes qui précèdent.

Un avantage immense qui résulte de l'emploi de ce mode d'action électro-magnétique, en outre de la plus grande course que l'on obtient, c'est que l'armature étant placée à une très-petite distance des bords polaires de l'électro-aimant, l'action magnétique directe qui est la plus forte réagit dès le premier moment de la course de l'armature. Or, c'est précisément le cas inverse des autres systèmes d'attraction, et l'on peut comprendre dès lors, combien, dans beaucoup de cas, cette propriété est précieuse.

M. Dezelu, dans deux électro-moteurs qu'il a exposés l'année dernière, a adopté deux dispositions d'armatures qui permettent à un électro-aimant droit de réagir comme

1. L'expérience prouve en effet que la force électro-magnétique est plus forte sur les bords des pôles de l'électro-aimant qu'au centre. Il suffit pour s'en convaincre de suspendre à un fil un morceau de fer, et de l'exposer normalement au-dessus des centres polaires. On voit alors le fer dévier de la verticale et se porter vers les bords.

un électro-aimant à deux branches. Dans l'une de ces dispositions, l'armature se recourbe à ses deux extrémités de manière à atteindre les deux pôles de l'électro-aimant en enveloppant la bobine. Alors la tige qui la porte est normale à l'axe de l'électro-aimant, et peut, en traversant l'électro-aimant lui-même, porter une seconde armature, comme on le voit, fig. 29. Dans l'autre disposition, l'électro-aimant est creux, et l'armature, qui est alors droite, se trouve à l'intérieur du cylindre de fer. La tige de cette armature traverse l'électro-aimant, et l'action de celui-ci se manifeste dans un sens ou dans l'autre suivant la proximité de l'armature de l'une ou l'autre des parois du cylindre. Pour simplifier la disposition des pièces, M. Dezeli a préféré donner à son électro-aimant la forme oblongue, comme on le voit, fig. 30 et 31.

Dans ces différents systèmes d'ajustement des armatures, il faut, autant que possible, que les pivotages s'effectuent sur pointes, ce qui est facile à obtenir puisqu'il suffit pour cela d'adapter aux paliers des supports, des vis de pression à pointe. Quelquefois cependant on peut substituer avec avantage aux articulations des lames de ressorts, et ces lames remplissent en même temps la fonction du ressort antagoniste comme on peut en juger par la fig. 27. Ce système est surtout préférable quand il s'agit d'une vibration à produire de la part de l'armature comme dans l'interrupteur de de La Rive que M. Mirand a utilisé avec bonheur aux sonneries électriques et aux appareils électromédicaux. On conçoit en effet que l'élasticité de la lame amplifie encore l'effet de la vibration.

Lorsqu'on veut obtenir de la part d'un électro-aimant deux effets mécaniques différents sans employer d'armatures aimantées, deux armatures placées parallèlement l'une à côté de l'autre, deviennent nécessaires; mais il faut que leurs ressorts antagonistes soient inégalement tendus.

En adaptant deux piles distinctes au transmetteur en rapport avec cet électro-aimant et en réglant la tension de ces ressorts antagonistes de manière que l'une des armatures puisse fonctionner sous l'influence d'une seule des piles tandis que l'autre exigera, pour être attirée, le concours des deux piles prises ensemble, on obtiendra que l'une des armatures puisse fonctionner sans que l'autre participe à son mouvement. Un mécanicien d'Amiens, M. Freitel, a employé ce système électro-magnétique, pour un télégraphe imprimeur qu'il a envoyé l'année dernière à l'Exposition universelle; et pour un motif dont je ne me suis pas rendu compte, il a taillé ses armatures en forme de prismes triangulaires, ce qui l'a conduit à pratiquer sur les pôles de son électro-aimant un double évidement angulaire. (Voir fig. 32.) Tout ingénieux que peut être ce système, il ne peut présenter une grande sûreté dans sa manière de fonctionner, car l'intensité des piles variant continuellement, il peut se faire que l'attraction qui a été à peine suffisante pour attirer celle des armatures la moins tendue, puisse le devenir assez pour attirer les deux armatures à la fois. Néanmoins, dans certaines applications, ce système peut être appliqué avec avantage, mais il faut alors que la différence de tension entre les deux ressorts antagonistes soit considérable.

2° *Ressorts antagonistes.* Quand on ne veut employer que l'action seule d'un électro-aimant sur une armature de fer doux, on comprend qu'il est nécessaire d'avoir une force antagoniste à opposer à celle de l'aimant, pour que l'armature, après avoir été attirée, puisse se relever et revenir à sa position primitive. Cette force peut être produite de différentes manières, soit par des ressorts, soit par le simple effet de la pesanteur, mais quel que soit le moyen employé, le point important est de pouvoir régler la tension ainsi exercée.

Le moyen le plus ordinaire est l'emploi de ressorts à boudin en cuivre jaune, que l'on attache d'un côté à l'armature et que l'on fixe du côté opposé à un fil qui s'enroule sur un petit treuil. En tournant ce petit treuil, soit d'un côté soit de l'autre, on tend ou on détend le ressort. Ce moyen peut être employé dans presque tous les cas; cependant, comme le ressort présente une grande élasticité, il vaut mieux, quand l'appareil doit éprouver une certaine trépidation, avoir recours aux effets de la pesanteur, qui ne présentent jamais cet inconvénient. (Les fig. 32, 33 bis, 36, etc., offrent un exemple de ce genre de ressorts.)

Pour obtenir que la pesanteur agisse comme force antagoniste, rien de plus facile. Vous prolongez l'armature au delà des points de son articulation, ou bien vous y adaptez un bras de levier plus ou moins long, et vous faites courir sur ce bras de levier un contre-poids assez fort pour équilibrer le poids de l'armature. Que l'électro-aimant agisse de bas en haut ou de haut en bas, ce moyen peut toujours convenir, et l'on règle, en avançant ou en reculant le contre-poids qui est muni à cet effet d'une vis de pression, la force antagoniste que l'on juge nécessaire.

La fig. 35 représente un système de ce genre, et de plus une combinaison à l'aide de laquelle l'effet antagoniste ne réagit sur l'armature que par l'intermédiaire d'un levier. Cette combinaison a deux grands avantages, d'abord celui d'économiser la place dans les appareils, et en second lieu de fournir une action considérable avec un très-petit contre-poids; ce qui est facile à comprendre puisque le bras de levier de la bascule qui réagit sur l'armature peut être très-court. M. Paul Garnier emploie toujours ce système dans ses horloges électriques.

Enfin, comme troisième moyen, on peut employer les lames de ressort, que l'on place soit sous l'armature au

point où elle doit être soulevée, soit au-dessus de cette armature avec une tige de liaison doublement articulée, ou simplement un fil de soie (fig. 39). On règle ces ressorts par une vis de rappel qui en diminue ou en augmente la tension. Dans certaines applications où l'on a besoin d'un effet antagoniste de longue durée, par exemple dans l'horlogerie électrique de précision, ce système de ressorts antagonistes est préférable aux ressorts à boudin. Ceux-ci en effet, au bout d'un certain temps, perdent de leur élasticité et l'on est obligé de les tendre de nouveau. Avec les ressorts d'acier cet inconvénient n'existe pas. Jusqu'à présent, néanmoins, on n'a généralement fait usage de ces derniers ressorts que dans les cas assez rares où l'on veut seulement détacher l'armature de l'électro-aimant; par exemple, dans les appareils où l'armature n'intervient que pour maintenir une détente.

On peut employer encore, avec beaucoup d'avantages, les ressorts d'acier quand il s'agit de produire un effet antagoniste à un mouvement circulaire, par exemple quand on veut rappeler à sa position primitive une armature qui aura décrit un arc de cercle. Alors on emploie les spirales de l'horlogerie, c'est-à-dire de petites lames de ressort roulées en spirale que l'on fixe d'un côté à l'armature ou sur son pivot, et de l'autre, sur une partie rigide; il devient ensuite facile avec les boutons à raquettes de régler la force de ce ressort comme on le fait du reste pour le spiral des balanciers de montre. Ce genre de ressorts a été employé par M. Weare pour ses horloges électriques à balancier circulaire marchant sous l'influence de piles sèches, par M. Bain, dans ses cadres galvanométriques à inflexion, et par moi, dans mon système d'électro-aimants, représentés fig. 38, etc.

3^e *Buttoirs d'arrêt.* Pour limiter l'écart de l'armature d'un électro-aimant on est obligé de placer en arrière un

buttoir d'arrêt, c'est-à-dire une cheville métallique contre laquelle cette armature vient appuyer quand elle est abandonnée à la seule influence du ressort antagoniste. Mais comme cet écart doit être réglé, on préfère employer comme buttoir une vis de rappel qu'il suffit de tourner plus ou moins pour rendre l'écart plus ou moins grand.

Dans les appareils à vibration ordinaire comme l'interrupteur de de La Rive et les appareils à détente, ces buttoirs rigides peuvent être remplacés avantageusement par des lames de ressorts dont l'élasticité contribue à entretenir la vibration et à atténuer le choc. C'est un buttoir de ce genre que M. Mirand a adapté à ses sonneries électriques.

Les buttoirs jouent un grand rôle dans les relais puisque ce sont eux qui établissent par leur contact métallique avec l'armature les communications électriques qui sont nécessaires.

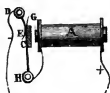
4° *Forme des armatures.* Nous avons vu que les armatures posées de champ sur les pôles de l'électro-aimant étaient attirées avec plus de force que posées dans l'autre sens. Il faut donc dans les différentes dispositions qu'on donne aux armatures combiner leur forme pour satisfaire à ce principe. Dans les cas ordinaires rien n'est plus facile, mais quand on veut employer d'autres armatures montées dans le système de la fig. 33, il faut qu'elles soient formées de deux pièces, d'un support en cuivre qui est articulé comme il a été dit, et d'une armature fixée en croix à l'extrémité de ce support; celle-ci alors peut se présenter de champ et réunir les conditions avantageuses que nous avons signalées.

Pourtant dans certains cas la disposition sur champ des armatures devient si dispendieuse de main-d'œuvre qu'il vaut mieux employer les palettes de fer ordinaires.

Nous avons donné au commencement de ce travail les lois de l'attraction des électro-aimants par rapport aux di-

mensions des armatures, mais pour parler un langage plus pratique, je dirai que ces armatures atteignent en général leur maximum de force quand leur épaisseur (qui est exposée à l'action de l'électro-aimant) est environ le tiers de leur largeur.

Les armatures peuvent être longues, carrées, rondes, oblongues, etc., sans qu'il y ait une différence bien sensible dans leur effet d'attraction, pourvu toutefois que leur masse soit suffisante pour correspondre à l'électro-aimant. Mais comme il arrive souvent que cette masse est nuisible, en raison de sa force d'inertie, à l'effet mécanique que l'on se propose, il en résulte qu'on doit quelquefois sacrifier les bénéfices de la force à l'action plus vive et plus prompte de l'appareil. C'est pourquoi dans les télégraphes de Morse les armatures consistent uniquement dans un petit disque de fer doux. C'est pourquoi encore dans les appareils à communications on emploie ordinairement un petit morceau de fer carré soudé à l'extrémité d'un ressort.



Il faut donc avant tout, dans le choix que l'on fait de la forme des armatures, considérer le but qu'on se propose ; si c'est la force qu'on recherche, employez des armatures lourdes ; si c'est la vitesse d'action, employez des armatures légères.

Quand par la disposition adoptée fig. 27 l'armature doit s'enfoncer dans les bobines même de l'électro-aimant, elle constitue un véritable fer d'électro-aimant qui se meut à la manière des pistons des machines à vapeur. Dans ce cas,

elle se compose donc de deux cylindres de fer (du calibre des bobines) réunis par une traverse de même métal et forment elles-mêmes un électro-aimant double ¹. D'autres fois les armatures sont constituées par des électro-aimants droits ou recourbés, armés de toutes pièces (fig. 7). D'autres fois encore elles sont remplacées par d's cylindres de fer qui se présentent à l'action de l'électro-aimant par le bout ; nous avons vu (fig. 13) quelle forme il convenait alors de donner aux électro-aimants. Enfin il arrive qu'elles sont formées elles-mêmes par un cylindre de fer, quand on les emploie comme électro-transmetteurs de mouvement, comme dans la fig. 28.

ÉLECTRO-AIMANTS A ARMATURES AIMANTÉES.

La propriété que possèdent les électro-aimants de changer de pôles par la permutation de sens du courant qui les traverse, a pu être utilisée non-seulement à éviter l'emploi des ressorts antagonistes dans les applications mécaniques que l'on en fait, mais encore à faire fonctionner, avec l'intermédiaire d'un même fil, deux appareils différents sous deux influences différentes.

Mais pour que cette propriété si importante des électro-aimants puisse se manifester, il faut que leur armature au lieu d'être en fer doux soit en acier trempé, et fortement aimantée. On conçoit en effet qu'une armature aimantée, ayant des pôles fixes et invariables, peut être soumise aux effets de l'attraction ou aux effets de la répulsion suivant que le courant inducteur, par sa direction, fait naître en regard de ces pôles fixes des pôles de nom contraire ou des pôles de même nom. Toutefois, l'un de ces effets peut être

1. La machine électro-motrice de Bourbonze offre un exemple de ce système d'électro-aimants.

supprimé par l'interposition du buttoir d'arrêt, comme nous le verrons plus tard.

M. Glæsner, professeur de physique à l'Université de Liège, paraît être le premier qui ait eu l'idée d'employer des électro-aimants à armatures aimantées dans les applications mécaniques de l'électricité; mais son but principal en les employant était de supprimer les ressorts antagonistes des armatures en fer auxquels il attribuait une influence nuisible pour la marche des appareils. Voici comment il démontre cette influence nuisible :

« Le fer doux, dit M. Glæsner, doit, pour les usages de la télégraphie, vibrer continuellement avec une grande rapidité sous deux influences opposées ; mais ces vibrations ne peuvent se faire sans trouble et sans irrégularité qu'autant qu'il y a un rapport de grandeur déterminé entre la tension du ressort antagoniste et la force attractive de l'électro-aimant sur l'armature de fer doux. En effet, si le courant est faible et que le ressort soit très-tendu, l'électro-aimant ne pourra déplacer l'armature ; si, au contraire, le ressort est peu tendu, tandis que le courant est intense, il ne suffira plus pour ramener l'armature, et cela à cause du magnétisme rémanent, qui est proportionnel au magnétisme que le courant avait développé. Or, l'intensité d'un courant variant toujours avec le temps sous l'influence de plusieurs causes différentes; variant par l'inconstance des piles, même de celles qu'on appelle piles à courant constant; par l'influence de l'électricité atmosphérique et celle des orages; par l'isolement toujours plus ou moins imparfait des fils conducteurs des lignes télégraphiques, ainsi que par des causes locales; il en résulte que le ressort antagoniste nécessite un réglage presque continu, ce qui amène en même temps un retard dans les communications. Si l'on ajoute à ces inconvénients que présentent les ressorts antagonistes la réaction du magné-

tisme rémanent qui s'oppose toujours à la célérité des vibrations, et la résistance toujours appréciable du ressort antagoniste lui-même, qui n'intervient au moment de l'attraction de l'électro-aimant qu'au détriment de la force créée, on comprendra de quelle importance peut être, pour les applications mécaniques de l'électricité, l'emploi des armatures aimantées qui, tout en prévenant ces inconvénients, fournissent une force attractive bien plus grande. »

Bien que M. Glæsner, par certaines expériences qu'il cite, semble prouver que les électro-aimants à armatures aimantées sont plus énergiques que les électro-aimants ordinaires, je ne suis que médiocrement convaincu de ce fait, car, dans beaucoup d'appareils où j'ai employé concurremment des armatures aimantées et des armatures de fer doux, j'ai toujours trouvé que, placées dans les mêmes conditions, c'est-à-dire soumises à l'action d'un même ressort antagoniste et ayant la même masse et la même forme, les armatures de fer doux étaient attirées plus énergiquement que les armatures aimantées; seulement ces dernières étaient attirées de plus loin.

D'un autre côté, il ne faut pas trop se faire illusion sur les avantages que fournissent les armatures aimantées employées comme armatures ordinaires d'électro-aimants. Si elles évitent les inconvénients du réglage du ressort antagoniste et bénéficient de la résistance que ce ressort oppose à l'action électro-magnétique, elles ont en revanche l'inconvénient de se désaimanter facilement et de subir la réaction statique du magnétisme qui souvent les maintient attirées lorsqu'elles devraient être repoussées. Pour éviter ce dernier inconvénient on les éloigne ordinairement de l'électro-aimant afin que la réaction dynamique seule soit exercée; mais cet éloignement ne se fait qu'au préjudice de la force attractive.

Si on combine, comme M. Glæsner l'a fait, les armatures

aimantées avec un double système d'électro-aimants, l'un agissant par attraction, l'autre par répulsion, les avantages des armatures aimantées sont beaucoup plus marqués. Cependant il ne m'est pas encore prouvé que par ce moyen on gagne beaucoup de force attractive pour de petits circuits, car si l'action magnétique étant doublée facilite le mouvement des armatures, la force électrique se trouve diminuée de moitié par la bifurcation du courant à travers deux électro-aimants ou par l'augmentation de résistance du circuit si l'on ne bifurque pas le courant. Du reste, cette question de force n'intéresse que très-indirectement la télégraphie, et si j'en parle en ce moment c'est en vue d'autres applications électriques dans lesquelles les inconvénients des ressorts antagonistes ne sont que secondaires, et qui demandent avant tout le plus d'énergie possible dans l'action électro-magnétique.

Un grand avantage des électro-aimants à armatures aimantées dans la télégraphie, c'est qu'on peut les construire beaucoup plus gros que quand ils doivent agir sur des armatures de fer doux, par la raison que le magnétisme rémanent se trouve considérablement diminué par les changements successifs du sens du courant, et que d'ailleurs ce magnétisme rémanent importe fort peu puisque les appareils ne sont pas mis en action sous l'influence d'une interruption de courant. D'un autre côté, la force magnétique pouvant être utilisée d'une manière double, on peut, au lieu de charger un électro-aimant d'une grande quantité de fil, répartir cette quantité entre deux électro-aimants et obtenir par là une augmentation de force, non-seulement par l'action magnétique double, mais encore par l'action plus directe et plus rapprochée des spires de la bobine sur le fer de l'électro-aimant. Dans les appareils télégraphiques, en effet, la résistance du fil des électro-aimants ne doit plus être calculée d'après la résistance seule de la pile, les cir-

cuits des lignes sont en général assez longs pour décider à eux seuls de la quantité de fil dont ces électro-aimants doivent être enroulés. Or, comme cette quantité de fil, qui doit fournir une résistance égale à celle de la ligne télégraphique, doit être considérable pour une ligne un peu longue, le point important est de la bien utiliser ; et la répartition de ce fil sur deux ou quatre électro-aimants, comme l'a proposé M. Gläser, est évidemment une très-avantageuse combinaison.

Si l'on considère que deux électro-aimants à armatures aimantées peuvent, étant traversés par un même courant, opposer aux pôles fixes de leur armature respective des pôles de même nom ou des pôles de nom contraire, on comprendra facilement que sous une même influence électrique on puisse obtenir une double action mécanique qui sera complètement différente pour chacun des deux électro-aimants. De plus, si les armatures de ces électro-aimants sont disposées comme les armatures ordinaires, c'est-à-dire avec un ressort antagoniste et un buttoir d'arrêt, cette double action mécanique pourra être réduite à une seulement qui sera produite par l'un ou l'autre des deux électro-aimants suivant la direction du courant qui les traversera. En effet, supposons que le courant qui fera marcher deux électro-aimants, A et B, soit dirigé de manière à attirer l'armature de A et à repousser celle de B, l'attraction de l'armature de A pourra librement s'effectuer, mais la répulsion de l'armature de B ne pourra se faire, car le buttoir d'arrêt l'en empêche. Pour ce sens du courant l'action mécanique ne proviendra donc que de l'électro-aimant A, et l'électro-aimant B sera comme inerte ; mais si on renverse le sens du courant, l'électro-aimant B qui était inerte deviendra actif, tandis que l'électro-aimant A qui était actif deviendra inerte. On voit donc qu'en employant ce système d'électro-aimants à armatures aimantées deux

effets mécaniques différents peuvent être déterminés par deux causes différentes sans nécessiter la présence de deux fils, ce qui est un avantage immense dans une foule d'applications.

DISPOSITIONS DIFFÉRENTES DES ÉLECTRO-AIMANTS A ARMATURES AIMANTÉES

La disposition la plus simple de ces sortes d'électro-aimants est celle représentée fig. 39. Elle consiste dans un électro-aimant droit muni de une ou de deux armatures articulées par l'un des bouts. Cette disposition n'est guère susceptible d'application que quand on veut obtenir un double effet mécanique par l'intermédiaire d'un seul fil. Dans ce cas, en effet, des ressorts antagonistes et des buttoirs d'arrêt peuvent toujours rappeler les armatures à une position fixe.

Quand on veut obtenir avec la disposition précédente une plus grande force, on place l'un à côté de l'autre deux électro-aimants droits (fig. 42) enroulés de la même manière et communiquant ensemble. Alors les armatures sont articulées par leur partie moyennue, et leurs buttoirs d'arrêt placés, soit des deux côtés d'un levier perpendiculaire à leur axe, soit à leurs extrémités, permet de les maintenir au moment de l'attraction à distance suffisante pour que la réaction magnétique de l'aimant sur le fer de l'électro-aimant, ou la réaction statique de celui-ci sur l'aimant, malgré la similitude des pôles opposés, ne soit pas nuisible à l'effet mécanique que l'on cherche à obtenir. Avec cette disposition, adoptée par M. Régnard dans ses télégraphes, les armatures sont soumises en même temps à une action attractive et à une action répulsive, toutes deux conspirantes dans un même sens, ce qui double la force.

Il ne faudrait pas croire qu'en disposant deux électro-

aimants droits de manière à présenter d'un même côté des pôles de nom contraire, on pourrait leur adapter avantageusement des armatures disposées comme dans la fig. 39, tout au contraire, la force attractive en serait de beaucoup diminuée parce que, d'un côté, l'augmentation d'effet attractif dû à l'électro-aimant le plus rapproché de l'articulation serait loin de correspondre à l'affaiblissement du courant par suite de l'allongement du circuit, et que l'action polaire de cet électro-aimant ne s'exerce pas sur le pôle de l'aimant, et tend à créer au sein de l'armature un point conséquent. On pourrait, par exemple, avec cette disposition des électro-aimants, combiner les armatures comme on le voit fig. 40, et l'on aurait alors un effet presque aussi bon qu'avec la disposition de M. Régnard. Je dis presque, parce qu'avec les armatures bascules on a l'avantage que la force répulsive agit au maximum quand la force attractive est au minimum.

En combinant les dispositions précédentes avec d'autres systèmes d'électro-aimants comme on le voit fig. 42, on peut rendre l'application des armatures aimantées plus facile dans certaines circonstances et en augmenter l'énergie. On peut même remplacer ces armatures par les armatures électro-aimants, représentées fig. 7; alors on obtient une force considérable. Toutes ces dispositions sont indiquées dans un mémoire fort intéressant de M. Régnard sur la télégraphie électrique; elles sont toutes particulièrement applicables dans le cas où deux actions mécaniques différentes doivent être produites par deux causes différentes en n'employant qu'un même fil.

Quand les armatures aimantées doivent être mises en jeu à la fois par l'attraction et par la répulsion, les doubles électro-aimants doivent être employés. Les fig. 40 et 41 indiquent les dispositions les plus usitées dans ce cas. Elles ont toutes les deux l'avantage de pouvoir se combiner avec

l'action d'une troisième force agissant normalement aux deux autres. Cette troisième force peut être la pesanteur.

Dans la fig. 40 l'armature est une palette aimantée pivotant sur pointes selon son axe ; mais dirigée à l'état normal suivant la verticale. Elle oscille entre les quatre pôles des deux électro-aimants doubles disposés en sens inverse les uns des autres. Quand le courant est dirigé de manière à ce que l'électro-aimant A ait des pôles de nom contraire opposés à ceux de la palette, celle-ci est attirée ; mais aussitôt que le courant est renversé, c'est l'électro-aimant B qui réagit par attraction et l'électro-aimant A par répulsion. Quand le courant est interrompu, c'est la pesanteur qui l'emporte et la palette reprend sa position verticale.

Dans la fig. 41 l'armature est une bascule aimantée qui oscille entre les pôles de deux électro-aimants ; mais on comprend aisément qu'un seul électro-aimant pourrait suffire. Si le poids de la branche inférieure de cette bascule est suffisant pour vaincre la réaction du barreau aimanté sur le fer de l'électro-aimant ou la réaction du magnétisme rémanent, au moment de l'interruption du courant, elle se trouve dirigée suivant la verticale ; mais, suivant que le courant se trouve dirigé dans un sens ou dans l'autre, elle incline soit à gauche, soit à droite. Cette disposition a été employée par MM. Tyer, Mirand, Loiseau, etc.

Il va sans dire que toutes ces dispositions peuvent être renversées, c'est-à-dire que les électro-aimants peuvent être substitués à leurs armatures et réciproquement. Dans certains cas même ces dispositions inverses présentent beaucoup d'avantages, et d'après M. Glæsner la force en serait accrue. Cette question mériterait d'être étudiée sérieusement ; toujours est-il que par suite de ce renversement, ce sont les pièces les plus lourdes qui sont les pièces mobiles, ce qui n'est pas un avantage pour l'accélération des mouvements, comme nous l'avons déjà dit. La fig. 43 re-

présente un exemple de disposition magnétique de ce genre.

Si l'on joint à ces dispositions des électro-aimants à armatures aimantées celles dans lesquelles des cadres galvanométriques exercent leur action dans le même sens que les électro-aimants (fig. 44), on aura à peu près une idée des principales combinaisons électro-magnétiques propres à produire une action mécanique qui ont été imaginées jusqu'ici.

Nous avons signalé précédemment la désaimantation des armatures comme un des inconvénients du système d'électro-aimants à armatures aimantées. Cet inconvénient se fait tellement sentir quand les vibrations de la palette sont très-accélérées, que l'appareil finit par ne plus fonctionner du tout. C'est ce qui est arrivé au système télégraphique de M. Pouget-Maisonneuve, établi d'après le principe de celui de M. Gläserner. Cette désaimantation subite venait de ce que la permutation de sens du courant se faisant avant que les vibrations de la palette ne fussent totalement accomplies, les pôles de l'électro-aimant, qui auraient dû exercer une action répulsive, attiraient la palette sous une influence magnétique opposée à celle qui était développée sur elle. Pour éviter cet inconvénient, M. Loiseau a eu l'idée d'employer des armatures aimantées disposées de manière à ne subir l'effet magnétique de l'électro-aimant que par un pôle seulement, comme on le voit fig. 20. Ce moyen a parfaitement réussi, et cela vient sans doute de ce que le pôle libre de l'armature, qui n'est jamais désaimanté, maintient développé forcément le magnétisme de l'autre pôle.

Il arrive quelquefois dans certaines applications de l'électricité, qu'on ait à maintenir, après la cessation d'action du courant, l'effet électrique qui a été exercé en dernier lieu sur une armature. On peut obtenir cet effet soit par l'action attractive plus ou moins affaiblie (à l'aide d'une vis-buttoir) de l'aimant sur le fer où le magnétisme rémanent de celui-ci, soit par l'addition d'une pièce de fer dans le

voisinage des deux positions où l'armature doit se maintenir. Le moyen qui a le mieux réussi à M. Mirand, qui a construit un appareil dans ce système, a été de faire butter l'armature aimant contre le fil de l'électro-aimant et de la placer entre les deux branches de celui-ci. Le magnétisme rémanent seul suffisait alors pour la maintenir inclinée dans un sens ou dans l'autre après la cessation d'action du courant, mais ne l'empêchait pas, comme cela arrive dans un contact plus direct, de se trouver sollicitée à agir dans un sens opposé quand l'électro-aimant redevenait actif.

Avec ce système, qui convient surtout aux appareils qui demandent une grande course, mais n'exigent pas de force sensible, l'action est double, puisque les deux fils de l'électro-aimant agissent dans le même sens sur le barreau aimanté; mais on conçoit qu'avec un électro-aimant droit ou à une seule branche, le même effet peut être produit aussi bien encore qu'en employant deux électro-aimants placés l'un vis-à-vis de l'autre par leurs pôles opposés.

TRANSMISSIONS MAGNÉTIQUES.

Si le magnétisme rémanent est nuisible dans le jeu des électro-aimants, il est souvent des cas où il peut être utilisé. Nous venons d'en voir un exemple précédemment. D'un autre côté la présence d'un pôle de nom contraire à celui sur lequel on doit opérer, rend la réaction infiniment plus énergique, quelque minime que soit d'ailleurs la force de ce pôle et quelle que soit la distance qui le sépare de l'hélice magnétisante. Il devient donc urgent dans ces cas particuliers d'avoir à sa disposition des moyens de transmission magnétique analogues à ceux des transmissions électriques. Ces moyens sont tout aussi faciles dans un cas que dans l'autre, si l'on se rappelle la manière dont le magnétisme se distribue dans les électro-aimants à

pôles multiples: Veut-on, par exemple, établir dans le voisinage d'un aimant permanent une action magnétique rémanente susceptible d'être graduée et de maintenir cet aimant dans une position déterminée, même après la cessation de l'action électrique qui aura agi sur lui? Il suffira de faire partir de ce point un fil de fer que l'on introduira au-dessous de celle des deux branches de l'électro-aimant qui devra fournir le pôle dont on a besoin et de rapprocher plus ou moins l'extrémité de ce fil du point de repos de l'aimant. On pourra graduer de cette manière l'énergie de son action magnétique. Veut-on faire réagir plus énergiquement un électro-aimant droit sur son armature? Unissez par un fil de fer le point d'articulation de cette armature avec celui des deux pôles de l'électro-aimant qui n'agit pas, et vous aurez immédiatement un accroissement de force. Ces transmissions magnétiques peuvent être d'un très-grand secours, et elles sont déjà venues en aide à M. Ruhmkorff pour stimuler l'action de l'interrupteur de son appareil d'induction. Je les ai moi-même employés dans mon appareil à signaux des chemins de fer pour renforcer, suivant que besoin en est, le magnétisme rémanent de l'électro-aimant à travers le fil. Il va sans dire que des morceaux de fer placés convenablement dans le voisinage des aimants pourraient remplir la même fonction, mais ils ne peuvent s'appliquer que dans un petit nombre de cas.

AUTRES MOYENS D'OBTENIR DES EFFETS D'ATTRACTION TEMPORAIRE.

Toutes les réactions magnétiques des courants peuvent, comme je l'ai déjà dit, être utilisées dans un but mécanique ayant pour cause un mouvement d'attraction temporaire. Ainsi les réactions réciproques des courants parallèles ou angulaires, les réactions des courants sur les aimants pour-

raient au besoin être substituées à celles des électro-aimants. Mais comme elles nécessitent une force électrique considérable, comme leur effet est moins énergique, c'est toujours aux électro-aimants qu'on donne la préférence.

Pourtant dans certaines circonstances on emploie avec avantage les réactions réciproques des courants parallèles dans les bobines magnétiques et la réaction des courants sur les aimants persistants dans les cadres galvanométriques infléchis ou rigides. Nous ne nous occuperons que de ces deux systèmes qui, jusqu'à présent, sont les seuls qui aient été employés dans les applications de l'électricité.

Bobines magnétiques. — Si on fait entrer environ au tiers d'une hélice magnétisante ou d'une bobine de cuivre recouverte de cette hélice un cylindre de fer, celui-ci devient un aimant et par conséquent se trouve sillonné par un courant magnétique qui est parallèle au courant électrique, et qui de plus est dirigé dans le même sens, comme le prouve la similitude des pôles de l'hélice et du fer introduit. Ces deux courants étant parallèles et leur action étant multipliée par la quantité considérable de spires de l'hélice magnétisante, il s'opère entre les deux courants une attraction qui a pour effet de faire entrer le cylindre de fer doux dans la bobine jusqu'à ce que ses deux extrémités soient symétriquement placées par rapport à celles de la bobine. C'est cette action qui, dans quelques machines, entr'autres dans un de mes moteurs électriques, a été utilisée comme force attractive; elle a l'avantage de fournir une grande course à la pièce mobile et de ne pas la soumettre aux caprices du magnétisme rémanent.

C'est quand le cylindre de fer est arrivé au milieu de l'hélice magnétisante que la force est la plus grande, mais on peut l'augmenter aux deux extrémités en y adaptant des rondelles de fer que l'on fixe sur les rondelles de cuivre de la bobine. De cette manière il se joint à la réaction dyna-

mique des courants celle du cylindre mobile devenu électro-aimant sur les rondelles de fer à l'état neutre vers lesquelles il se dirige. En terminant le cylindre du côté opposé à celui où il doit s'enfoncer dans la bobine magnétique par un épaulement, on a l'avantage de le faire agir par attraction normale sur la rondelle de fer de ce côté de la bobine, ce qui est un avantage ; la fig. 25 représente la bobine magnétique que j'ai ainsi perfectionnée.

C'est dans ces sortes d'appareils d'attraction que les réactions statiques dont nous avons parlé au commencement de ce chapitre doivent être évitées avec le plus de soin, car elles suffiraient à elles seules pour détruire complètement l'effet dynamique exercé. Ainsi, avec une bobine de fer ou même avec une bobine de cuivre enroulée de fil de fer, la seule réaction statique échangée entre le cylindre mobile et le fer du canon ou le fil suffit pour paralyser complètement le courant magnétique créé dans le cylindre, et, par suite, le mouvement de celui-ci.

Pour augmenter la puissance d'attraction de l'hélice magnétisante, MM. Antinori et Palmieri ont proposé de la recouvrir d'une chemise de fer doux. Aucun effet magnétisant n'est à la vérité produit sur cette chemise par l'hélice, mais il s'opère une réaction dynamique entre elle et le cylindre de fer qui contribue puissamment à augmenter la force d'impulsion par laquelle celui-ci se trouve entraîné dans la bobine.

Puisque c'est aux réactions réciproques du courant électrique et du courant magnétique créé dans le fer mobile à l'intérieur de l'hélice magnétisante, qu'est due l'impulsion qui entraîne ce fer, il doit s'ensuivre qu'en remplaçant le fer par une seconde hélice dans laquelle le courant électrique circulera dans le même sens, on devra obtenir de la part de cette dernière un mouvement analogue. C'est en effet ce qui a lieu, et c'est sur ce principe que M. Siemens

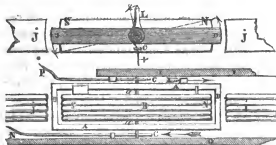
a construit un électro-moteur à une seule bobine qui a pu fonctionner parfaitement; seulement, afin de rendre les frottements moins durs et éviter l'usure de la matière isolante qui recouvre le fil de l'hélice mobile, il lui a fallu envelopper celle-ci dans un cylindre métallique très-mince. (Voir fig. 26.)

Cadres galvanométriques. — Les télégraphes anglais marchent sous l'influence des réactions d'un multiplicateur ou cadre galvanométrique sur un barreau aimanté, disposé comme l'aiguille astatique d'un galvanomètre; ce système n'est donc autre chose que le galvanomètre réduit à sa plus simple expression; seulement, comme il ne s'agit pas alors de constater une quantité excessivement faible d'électricité, mais bien de pouvoir obtenir une indication certaine avec une force électrique très-appreciable, toutes les conditions du problème se sont trouvées réduites à des conditions de force de la part du multiplicateur, c'est pourquoi on a donné à celui-ci des dimensions considérables et on l'a fait réagir sur un barreau aimanté au lieu d'une aiguille. De plus, afin que ces réactions fussent nettes et précises, on a fait pivoter le barreau entre deux supports fixés à l'intérieur du cadre galvanométrique. Ordinairement ces appareils galvanométriques sont disposés verticalement pour éviter l'action du magnétisme terrestre dans le sens de la déclinaison, laquelle action serait nuisible au fonctionnement de l'appareil.

Dans plusieurs appareils qu'il a fait construire, M. Bain a donné aux cadres galvanométriques employés comme détente une position précisément inverse. Ainsi le barreau aimanté, au lieu d'être mobile, est fixe, et c'est le cadre galvanométrique qui s'incline dans un sens ou dans l'autre suivant le sens du courant qui le traverse. A cet effet, il pivote sur deux pointes fixées sur l'aimant fixe.

Pour augmenter la force de ce système, M. Bain a substitué au simple barreau aimanté des cadres galvanomé-

triques ordinaires un faisceau d'aimants dont il a pu renforcer l'action par l'addition de deux autres faisceaux placés dans leur prolongement en dehors du cadre galvanométrique.



On conçoit que, disposé de cette manière, le cadre galvanométrique est moins lourd à se mouvoir que le système magnétique, et c'est pourquoi M. Bain a ainsi renversé le système galvanométrique ordinaire. Remarquons toutefois, qu'en raison de sa masse, ce système ne peut convenir à des mouvements prompts. Aussi l'inventeur, en l'employant, n'a-t-il voulu, comme je le disais en commençant, qu'obtenir de la force.

ORGANES ÉLECTRO-CHIMIQUES.

Les réactions magnétiques des courants ne sont pas les seules manifestations électriques qui puissent être employées dans les applications physiques et mécaniques de l'électricité. Les attractions électriques exercées sur les corps légers, les combinaisons ou décompositions chimiques résultant de décharges électriques ou de l'action des courants voltaïques, les réactions calorifiques ou lumineuses de ces courants peuvent être mises à profit dans beaucoup de ces applications. Ainsi les gaz dégagés sous

l'influence de l'eau décomposée, la détonation produite par la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène sous l'influence de l'étincelle électrique, l'attraction de petits pendules en moelle de sureau, le changement de couleur de certains corps décomposés par l'effet d'un courant, etc., etc., sont autant de réactions qui peuvent fournir une indication, un signal à distance. Mais de ces différentes réactions qui ont tour à tour été essayées dans les premières recherches que l'on a faites sur la télégraphie électrique, une seule a pu être utilisée concurremment avec l'électro-magnétisme, c'est l'action décomposante des courants et les changements de couleur auxquels elle donne lieu.

Il existe en effet certains composés chimiques qui, étant soumis à l'action d'un courant voltaïque, se dédoublent pour former avec le métal des électrodes de nouveaux composés énergiquement colorés. Parmi ces corps, celui qui jouit de cette faculté au suprême degré, est le *cyanure de potassium*. Si on trempe, en effet, une feuille de papier dans une dissolution de ce cyanure, et qu'on l'expose à l'action d'un courant dont l'électrode positive soit en fer, il se forme au point de contact de cette électrode avec la bande de papier un cyanure double de fer qui n'est autre chose que du bleu de Prusse. Comme ce corps se décompose avec la plus grande facilité, on peut obtenir par ce moyen des traits parfaitement distincts qui se détachent en bleu sur la bande de papier, et qui accompagnent l'électrode de fer sur tous les points où on la dirige. Par exemple, aussitôt que le courant cesse, la trace bleue est interrompue, et telle est la promptitude de l'action électrique dans cet effet électro-chimique que 1,500 signaux ont pu être transmis par ce moyen dans une minute de temps. C'est à M. Bain, mécanicien anglais, qu'on doit cette belle application électro-chimique.

Pour que la transmission électrique à travers une bande ainsi préparée se fasse d'une manière certaine, il faut qu'elle satisfasse à plusieurs conditions. Il faut d'abord qu'elle soit enroulée sur un cylindre métallique en rapport avec le pôle négatif de la pile. En second lieu il faut qu'elle soit suffisamment mouillée pour que le liquide serve de conducteur. Or cette dernière condition exige un soin tellement assujettissant qu'on a dû, à cause d'elle, renoncer jusqu'à présent à user des avantages immenses que promettait ce mode d'impression électrique. Dernièrement cependant M. Pouget-Maisonneuve, directeur du matériel des télégraphes électriques français, a trouvé moyen de rendre cette condition moins difficile à réaliser pratiquement en rendant *hygrométrique* le papier préparé au cyanure de potassium. De cette manière, c'est l'humidité de l'air qui entretient le papier dans les conditions voulues pour la transmission électrique.

Voici ce que dit à ce sujet M. Pouget-Maisonneuve dans la note qu'il a adressée à l'Académie des sciences :

« Les conditions nécessaires pour arriver à une parfaite réussite sont nombreuses, car il faut obtenir un papier qui soit : 1° très-peu coûteux ; 2° assez collé pour qu'on puisse y faire des annotations à l'encre ; 3° convenablement humide pour être conducteur ; 4° un peu acide pour augmenter sa conductibilité, mais pas assez pour altérer les métaux qu'il touche ; 5° facilement décomposable par l'électricité ; 6° donnant par la décomposition un sel fortement coloré insoluble et inaltérable ; 7° d'une préparation extrêmement simple, afin que chacun puisse le préparer soi-même ; 8° ne nécessitant pas l'emploi d'une pâte de papier spéciale ; 9° enfin d'une composition simple et facile et n'exigeant pas l'emploi de sels dans des proportions trop exactes.

« Deux sels communs dans le commerce suffisent pour la

préparation de ce papier, et voici, parmi bien des formules essayées, la plus simple, celle qui a réussi le mieux :

Eau.	100 parties.
Azotate d'ammoniaque cristallisé.	150
Cyanure jaune de potassium et de fer.	5

«Ce papier fonctionne pendant l'été et sans qu'il soit nécessaire de mettre le rouleau à l'abri de l'air. Il est évident, du reste, qu'en modifiant les proportions, on peut obtenir encore un bon résultat. Une courte immersion dans l'eau fait disparaître l'excès de préparation. On peut même la prolonger sans que la netteté des caractères tracés en soit aucunement altérée.»

Quoi qu'en dise M. Pouget-Maisonneuve, il paraît certain que ce papier doit être renfermé dans une boîte hermétiquement close pour se conserver dans de bonnes conditions de transmission pendant les temps secs. Mais comme il est facile de mettre les appareils électriques sous un globe de verre et de placer sous ce globe un vase rempli d'eau, l'air dans le voisinage du rouleau de papier préparé se trouve constamment saturé et le papier reste toujours humide.

Comme, dans le mode de transmission électrique par voie humide, l'énergie du courant dépend beaucoup de la largeur des électrodes, on comprend que les bifurcations de courant peuvent s'obtenir facilement, car alors les pointes de fer en rapport avec le courant constituent, prises collectivement, une électrode positive de surface plus grande.

CONSTRUCTION DES ÉLECTRO-AIMANTS.

Après avoir exposé, comme je l'ai fait, les conditions de force des électro-aimants et leurs différentes dispositions, il me reste à faire, en quelque sorte, le catéchisme du cou-

constructeur, c'est-à-dire, à lui faire connaître les différentes considérations qui doivent le guider dans le choix et la construction des électro-aimants. Souvent des questions m'ont été faites à ce sujet; et je crois, en les prévenant dans ce travail, rendre un véritable service aux praticiens.

Les considérations qui doivent préoccuper d'abord un constructeur dans la confection des électro-aimants, se rapportent :

- 1° A l'effet mécanique qu'il cherche à obtenir;
- 2° A la distance à laquelle ces électro-aimants doivent être placés de la source électrique;
- 3° Au nombre et à la nature des éléments de cette source électrique;
- 4° A la question économique de la production d'électricité.

Quand l'effet que l'on désire obtenir d'un électro-aimant n'est qu'un effet d'attraction énergique, on devra le choisir le plus gros possible et employer une armature massive; quand, au contraire, cet électro-aimant devra faire accomplir à son armature un grand nombre de vibrations de très-courte durée, il faudra qu'il soit petit, à pôles rapprochés, et que son armature soit excessivement légère. Toutefois, comme le degré de saturation magnétique dont un électro-aimant est susceptible dépend de la force électrique qui lui est appliquée, la détermination de sa grosseur devra dépendre de la longueur du circuit dans lequel il est interposé et de la nature de la pile qui doit le faire agir. En général, pour les courants de Daniell et un circuit d'une certaine longueur, le maximum de grosseur des électro-aimants ne doit pas dépasser 2 centimètres de diamètre de branches, et le minimum ne doit pas être au-dessous

de 5 millimètres¹. Pour les circuits très-courts et avec les piles de Bunsen, la grosseur des électro-aimants n'a pas de limite. On en a fait qui ont jusqu'à 20 centimètres de diamètre de branches et 40 centimètres de hauteur.

Cela posé, admettons qu'on ait déterminé, d'après les considérations précédentes, les dimensions d'un électro-aimant qui doit être interposé dans un circuit de 10 kilomètres de longueur composé de fils télégraphiques ordinaires, et supposons que la pile qui doit réagir sur lui se compose de 10 éléments de Daniell : quelle grosseur et quelle longueur devra-t-on donner au fil qui sera enroulé sur lui ?

Si l'on se rappelle que la résistance de l'hélice magnétisante doit être égale à celle du circuit voltaïque, plus la résistance intérieure de la pile, on arrivera d'abord à conclure que le fil qui devra être enroulé devra présenter une résistance égale à $(800 \times 10)^2 + 10 \text{ k.}$, c'est-à-dire à 18 kilomètres de fils de fer de 4 millimètres de diamètre. Or si on choisit du fil n° 16 recouvert de soie dont la section n'est que de 0,4 de millimètre, les 18 kilomètres de fil télégraphique équivaldront à 1260 mètres de ce numéro. En effet, les sections des fils croissant ou décroissant comme le carré des rayons, la section du fil n° 16 sera la centième partie de la section du fil télégraphique; par conséquent, d'après les lois de Ohm, la résistance de ce dernier fil sera, longueur pour longueur, 100 fois moindre que celle du fil n° 16. Il ne faudra donc que 180 mètres de ce dernier fil pour représenter en résistance les 18 kilomètres de fil télégraphique. D'un autre côté, comme le cuivre est environ 7 fois meilleur conducteur que le fer, cette quantité 180 devra être multipliée par 7 pour

1. Dans la majorité des cas, c'est 1 centimètre de diamètre de branches qui est la grosseur la plus convenable.

2. Cette expression représente la résistance intérieure de la pile.

donner la véritable longueur du fil à enrouler qui sera de 1260 mètres.

Si l'électro-aimant est assez gros pour que cette longueur de 1260 mètres ne le charge pas trop, on peut s'en tenir à ce calcul ; mais si le contraire a lieu, on est obligé de recourir à un numéro de fil plus fin. En prenant, en effet, le n° 24 du commerce, cette longueur de 1260 mètres se trouve réduite à 518 mètres.

Le tableau de la p. 242 indique les différentes grosseurs des fils mis en usage dans les applications mécaniques de l'électricité ainsi que leurs poids comparatifs et leur prix fort. Ces fils parfaitement conditionnés sont fabriqués chez M. Prudhomme neveu, rue Saint-Denis, n° 293, et ont été pour ce fabricant l'objet d'une récompense de 2^e classe à l'Exposition universelle de 1855.

Au moyen des poids indiqués sur ce tableau, on peut, jusqu'à un certain point, préjuger de la grosseur du fil que l'on doit employer. En effet, à moins de cas exceptionnels, on peut établir généralement qu'un électro-aimant soumis à l'action d'une pile de Daniell, ne doit pas porter plus d'un demi-kilogramme de fil pour être dans de bonnes conditions, c'est-à-dire pour que les spires extrêmes ne soient pas trop éloignées des branches de fer de l'électro-aimant. D'après ce raisonnement, on voit que, dans l'exemple cité précédemment, le fil n° 16 ne pourrait être choisi, car le poids des 1260^m serait 0 k., 130 × 12,60, c'est-à-dire 1 k., 638 g. Le fil n° 24, au contraire, rentre dans les limites de poids que nous avons assignées ; en effet, le poids de 518 mètres de ce numéro est 0 k., 080 × 5,18, c'est-à-dire 414 g., 40 d.

On voit qu'à l'aide de la table que nous donnons page 242 et de celle des résistances des piles que nous avons donnée, page 155, il est très-facile de déterminer la grosseur et la longueur du fil en rapport avec un électro-aimant donné.

Pour les circuits très-courts, quand la pile ne se compose que d'un seul élément, le calcul est encore plus simple.

NUMÉROS des FILS.	DIAMÈTRE du FIL MÉTAL.	POIDS des 100 MÈTRES.	PRIX convert EN COTON.	PRIX convert EN SOIE.	
NUMÉROS LIGNES.	1	0mm,6	04,300	8 f. le k.	46 f. »
	2	0,7	0,380	7 50	45 »
	3	0,8			
	4	0,9	0,550	7 50	45 »
	5	1,0			
		1,1	0,900	7 00	45 »
	7	1,2			
	8	1,3	1,500	6 75	44 »
	9	1,4			
	10	1,5	1,700	6 75	44 »
	11	1,7			
	12	1,8	2,190	6 50	44 »
	13	20			
	14	2,1	3,000	6 25	44 »
	16	3,6	4,700	6 00	44 »
NUMÉROS CARRETES.	12 cc/	0,5	0,170	8 50	47 »
	16	0,4	0,130	8 50	48 »
	20	0,32	0,100	10 »	20 »
	24	0,25	0,080	11 »	24 »
	28	0,21	0,060	Ne se font	30 »
	30	0,17	0,046	pas	36 »
	32	0,14	0,033	en Coton.	42 »

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'un élément de

Daniell. La résistance de cet élément représentant 800 m. de fil télégraphique, la longueur de fil qui devra être enroulée sera en fil n° 5 de 1 millimètre $\frac{800}{1,6} \times 7 = 350$, mais le poids de ce fil étant trop considérable nous prendrons le n° 2 (de Limoges), dont le diamètre est 0,7 de millimètre, nous aurons alors $R = \frac{800}{3,6} \times 7 = 154$ dont le poids équivaut à environ 570 grammes. Nous retrouvant alors dans les limites que nous avons assignées, on peut conclure que c'est 154 mètres du fil n° 2 qui correspondent le plus efficacement à l'action d'un seul élément de Daniell sans longueur appréciable de circuit.

En faisant les mêmes calculs pour les électro-aimants en rapport avec des piles Bunsen, on arrive à conclure que la longueur de fil, correspondant à la force électro-motrice d'un seul élément, est de 63 m. du fil n° 5 de 1 millim. de diamètre, ou de 147 m. du fil n° 10 de 1^{mm} 5 et de 441 m. du fil n° 16 (L) de 2^{mm} 6 de diamètre. Si on employait ce dernier fil, on aurait avantage à l'enrouler sur plusieurs fers d'électro-aimants, car cette longueur de fil correspondrait à un poids de 20 kilogrammes environ.

La question économique des électro-aimants sous le rapport de l'électricité qu'ils absorbent n'est à considérer que pour les courants qui sont toujours ou presque toujours fermés, et pour les électro-aimants qui seraient employés dans l'industrie si le problème des électro-moteurs était résolu. La réponse à cette question peut, du reste, se formuler en deux mots, c'est que la dépense de l'électricité est d'autant plus grande que le circuit offre moins de résistance ce que l'on conçoit, d'ailleurs, facilement si l'on se rappelle que l'action électro-chimique de la pile est d'autant plus énergique que l'intensité du courant qui la traverse est plus grande. Il en résulte que, pour dépenser le moins d'électricité possible, il faut charger de fil les élec-

tro-aimants ou en relier un certain nombre les uns aux autres quand on peut le faire sans obstacle.

Les autres considérations qui doivent préoccuper un constructeur se rapportant aux conditions de force que nous avons longuement énumérées au commencement de ce travail, je n'y reviendrai pas en ce moment; je dirai seulement en terminant ce chapitre qu'il faut, autant que possible, que la traverse qui unit les deux branches des électro-aimants présente une masse en rapport avec celle de ces branches, et que la longueur de celles-ci mesure à peu près quatre fois leur diamètre.

IV.

INTERRUPTEURS ET COMMUTATEURS.

Les interrupteurs de courants que certains savants appellent disjoncteurs, joncteurs, toucheurs, et quelquefois même à tort rhéotomes, sont des organes métalliques à l'aide desquels on peut opérer ou rompre un contact métallique d'où dépend la circulation d'un courant. Bien qu'au premier abord de pareils organes paraissent très-simples à établir, ils exigent pourtant certaines précautions qui sont indispensables pour leur bon fonctionnement.

Pour obtenir un bon interrupteur, il faut d'abord employer des métaux peu oxydables et très-bons conducteurs, du moins pour les parties de ces organes qui sont appelées à opérer le contact. En second lieu il faut que ce contact se fasse de manière à repousser la poussière qui peut s'être déposée sur les lames métalliques et à mettre le métal à nu en cas d'une légère oxydation. En troisième lieu il faut, autant que possible, que l'interrupteur soit combiné de

manière à diminuer le plus possible l'intensité de l'étincelle électrique; enfin il faut que le contact soit assez intime pour que de petites vibrations accidentelles ne viennent pas le détruire momentanément.

Les métaux qui fournissent les meilleurs résultats pour les pièces de contact des interrupteurs, sont le platine, l'or, et l'argent, peut-être encore l'aluminium, le sicilium, le tungstène, etc., etc.; ces pièces doivent être polies le plus possible, et légèrement bombées dans les parties où doit s'opérer le contact. Je ne parle, bien entendu, que pour les interrupteurs de faibles courants, car, pour les autres, toutes ces précautions sont à peu près inutiles.

Quant à la disposition de ces pièces, pour éviter les inconvénients de la poussière et pour revivifier le métal, elle est fort simple; il suffit de les placer l'une par rapport à l'autre de manière que le contact se fasse *par friction* ou par glissement. Tous les contacts par pression par galets sont mauvais, et cela se conçoit facilement, si l'on examine que, dans ce cas, la poussière, les corps gras, les oxydations qui existent toujours sur les pièces destinées à produire le contact, ne sont pas déplacées et constituent une couche isolante.

Pour diminuer l'intensité de l'étincelle qui, si elle ne détériore pas les pièces de contact, détermine toujours sur elles une plus ou moins grande oxydation, on peut diviser le courant et faire un interrupteur multiple; mais il faut que ces ramifications du courant partent d'assez loin et soient bien égales. Sans quoi le courant passerait principalement par un seul des interrupteurs. Par ce moyen, on peut répartir l'étincelle sur plusieurs points, et l'oxydation se trouve diminuée sur chacun d'eux en particulier.

Enfin, pour éviter les petites vibrations résultant de l'élasticité plus ou moins grande de la matière au moment

du choc des corps, il faut, autant que possible, éviter que les pièces qui doivent opérer les contacts soient massives. Ce sont toujours les contacts par ressorts qui sont les meilleurs, et cela parce que l'élasticité dont ils sont alors doués leur permet de se suivre dans tous les mouvements auxquels l'un d'eux pourrait être assujéti. D'ailleurs, avec des ressorts, les petites vibrations dues au choc de la matière se trouvent à peu près anéanties. Toutefois il arrive rarement que cette disposition puisse être donnée à l'interrupteur, et l'on se trouve alors forcé de n'employer qu'un seul ressort. Mais j'indiquerai plus tard un moyen efficace que l'on peut employer dans ce cas.

Une chose assez curieuse, et qui paraît être au premier abord en contradiction avec la théorie que l'on s'est faite de l'électricité, c'est que la plus ou moins grande pression exercée entre les pièces de contact des interrupteurs influe considérablement sur l'intensité du courant qui les traverse. Cela tient souvent à ce que les métaux de l'interrupteur ne sont pas toujours dans un état parfait de décapage au point de contact, mais peut-être aussi à une cause physique encore mal appréciée. Ce qui est certain, c'est que, dans les interrupteurs où la pièce mobile de contact est sollicitée par une force extrêmement minime, le courant éprouve souvent des affaiblissements assez notables pour faire manquer la réaction électrique qu'on attend d'eux.

Quand les interrupteurs sont appelés à réagir sur des circuits dans lesquels sont interposés des électro-aimants, ce qui arrive le plus communément dans les applications que nous aurons à étudier, ils peuvent, jusqu'à un certain point, être combinés de manière à paralyser en partie les effets nuisibles des courants d'induction qui naissent, comme on le sait, au moment de la fermeture et de l'interruption du courant voltaïque, et qui produisent dans le premier cas une réaction magnétique contraire à celle du

courant, et, dans le second, une étincelle beaucoup plus vive qui contribue à oxyder l'interrupteur. Toutefois les moyens à employer pour prévenir cet inconvénient, ne peuvent s'appliquer qu'à des courants d'une certaine énergie.

Pour obtenir cette espèce de paralysation des courants d'induction, il suffit d'adapter à chaque lame de contact de l'interrupteur un fil métallique en communication avec un condensateur en taffetas de grande étendue tel que celui que nous aurons occasion de décrire à l'article de l'appareil d'induction de Ruhmkorff. Au moyen de ce condensateur, les courants d'induction se trouvent condensés et n'exercent plus leur effet nuisible.

Les interrupteurs peuvent être conjoncteurs ou disjoncteurs; ils peuvent être même les deux à la fois et disposés pour des mouvements de va-et-vient et pour des mouvements circulaires; ils peuvent être simples et multiples; enfin ils peuvent avoir pour organe moteur la main des hommes, un mouvement d'horlogerie, un mouvement électro-magnétique, ou un mouvement mécanique quelconque. Suivant ces différents cas, ils doivent varier de forme et de disposition.

Les conjoncteurs simples, destinés à être manœuvrés par le doigt ou par la main, consistent ordinairement dans un simple bouton d'ivoire A (fig. 1, pl. III) monté sur une lame de ressort E B, laquelle est munie d'une tête E de platine ou d'argent. Cette lame elle-même est placée au-dessus d'une autre lame C D disposée de la même manière, de sorte que le contact a lieu aussitôt qu'on appose le doigt sur le bouton A.

D'autres fois comme dans les clefs des télégraphes américains, les deux pôles du courant aboutissent à deux pièces métalliques rigides dont l'une A B (fig. 2) munie d'un manche, est fixée au-dessus de l'autre J C par une articulation à ressort.

D'autres fois l'un des pôles de la pile est en rapport avec des plaques C, D, etc., (fig. 3), incrustées dans de l'ivoire ou dans une planche, et l'autre pôle aboutit par un conducteur extensible à une lame de ressort A B munie d'un manche que l'on peut passer au-dessus des plaques.

Les disjoncteurs sont l'inverse des précédents. Ils sont disposés de manière à ce que la pression exercée sur le bouton A (fig. 4) ait pour effet de séparer la lame B E de la lame C D.

Les interrupteurs à la fois conjoncteurs et disjoncteurs peuvent être disposés, comme l'indique la figure 4, ou bien comme on le voit (fig. 2). Seulement dans cette dernière figure, la vis D I doit être isolée du support du levier A B.

Ces mêmes interrupteurs peuvent être à la fois conjoncteurs complexes, comme on le voit (fig. 5), ou conjoncteurs complexes et disjoncteurs ou disjoncteurs complexes. Ce ne sont que des combinaisons de ressorts à effectuer de manière que la même pression amène tous les ressorts supérieurs en contact simultané avec les ressorts inférieurs, ou éloigne tous les ressorts inférieurs des ressorts supérieurs.

Dans les exemples précédents, les effets de conjonction ou de disjonction des ressorts s'effectuent dans le même sens que la pression qui est exercée sur eux, mais il peut arriver qu'on ait à exercer cette action sur deux ressorts placés de manière à ce que la disjonction ou la conjonction s'opère dans un sens perpendiculaire à la pression; alors on peut employer le système des leviers articulés, comme on le voit (fig. 6). Le levier A B oscille autour du point A qui est fixe; le levier B C est mobile dans deux articulations B et C, et le levier C D est sollicité par un ressort R. Quand une force est appliquée en B, le levier C D établit le courant en appuyant sur le ressort E F; ou supprime le contact en éloignant le levier D H du buttoir J H.

Ces sortes d'interrupteurs simples sont disposés, comme on le voit, de manière à fournir une fermeture de courant fugitive, mais il arrive souvent qu'on a à maintenir cette fermeture jusqu'à nouvel ordre. On peut alors employer pour le conjoncteur une clanche, comme on le voit (fig. 7) ou un frotteur à ressort (fig. 8) ou un cylindre interrupteur (fig. 9). Le frotteur à ressort consiste dans une lame de ressort A B (fig. 8) serrée par un écrou C sur une colonne D C et appuyant sur la planchette servant de support à l'appareil; deux ou plusieurs plaques incrustées dans cette planchette à portée du frotteur sont mises en rapport avec l'une des branches du courant par l'intermédiaire des différents circuits sur lesquels on a à agir, tandis que l'autre branche aboutit directement au support D C. Suivant que l'on tourne le frotteur d'un côté ou de l'autre, on ferme le courant à travers l'un ou l'autre des circuits correspondant aux plaques incrustées.

Le cylindre interrupteur (fig. 9) consiste dans un cylindre d'ivoire dont les deux extrémités sont revêtues de deux bagues métalliques mises en rapport par deux plaques A B A' B' placées suivant deux génératrices opposées du cylindre. Avec cette disposition, deux ressorts R S, R' S', placés à portée du cylindre et correspondant avec le circuit qu'il s'agit de fermer ou d'interrompre, sont mis en communication métallique par ces bagues toutes les fois que l'on tourne le cylindre de manière à ce que les traverses A B A' B' viennent les toucher. On pourrait encore obtenir le même effet des interrupteurs représentés (fig. 10, 11 et 12, mais ils sont généralement choisis pour être adaptés à des mécanismes à mouvement circulaire, par exemple, aux électro-moteurs.

Ces derniers interrupteurs sont tous à excentrique. Dans le premier (fig. 10), le courant pénètre par l'équerre A B dans l'axe A de l'excentrique métallique A E et en ressort par la

la lame C D à chaque révolution de cette excentrique. Dans le deuxième (fig. 11), l'excentrique A E donne à un levier C D articulé en B un mouvement de va-et-vient par l'intermédiaire d'un galet C; l'extrémité D de ce levier est munie d'une lame de platine, et suivant que l'excentrique l'incline d'un côté ou de l'autre, la communication électrique est établie par la plaque G ou par la plaque H.

Dans le troisième interrupteur (fig. 12), l'excentrique a pour effet de communiquer à une glissière A B C un mouvement de va-et-vient qui fait avancer et reculer alternativement une tige C D maintenue dans une coulisse I G H E. Cette tige C D, étant mise en relation avec le courant, peut, en rencontrant les plaques O et P, compléter alternativement deux circuits différents.

La fig. 13 représente un interrupteur à roue dentée. Quand le ressort C D appuie sur la sommité d'une dent, le courant est fermé; quand, au contraire, le ressort se trouve dans un espace vide, le courant est interrompu. On peut, par ce moyen, obtenir un très-grand nombre d'interruptions et de fermetures de courant dans un très-petit intervalle de temps. Toutefois, comme le ressort C D, par ses vibrations, peut pénétrer plus qu'il ne faut dans les vides des dents de la roue interruptrice, ce système d'interrupteur ne doit pas être employé pour des mécanismes de précision. Il faut alors avoir recours à celui qui est représenté (fig. 14.) C'est un cylindre en bois, en ivoire, en verre ou en caoutchouc durci sur lequel est adaptée une bague en cuivre rouge dentée de côté. Un rebord A B C D est ménagé sur le cylindre de manière à affleurer la surface de la bague métallique. Il en résulte que l'intervalle seul des dents présente une concavité. Un ressort I K appuie sur la partie pleine de la bague, tandis qu'un autre ressort J H appuie moitié sur le rebord isolant, moitié sur les dents de la bague. Avec cette disposition, le ressort interrupteur J H

est toujours soutenu et ne court pas risque d'établir des contacts fortuits en s'abaissant dans les intervalles des dents.

Il arrive souvent qu'on ait à produire une ou plusieurs fermetures de courant par l'intermédiaire d'un levier plus ou moins long mis en mouvement par un mécanisme quelconque. Ces fermetures peuvent être alors obtenues de deux manières : soit en rendant flexibles les lames fixes sur lesquelles doit s'opérer le contact, soit en terminant le levier lui-même par une lame flexible ou toute autre disposition mécanique permettant à la pièce mobile de contact de s'affaisser. Pour éviter, dans ce double mode d'interrupteur, les vibrations des pièces de contact, voici le moyen qui m'a le mieux réussi :

J'adapte à l'extrémité du levier qui doit agir comme interrupteur un petit levier en acier trempé AB (fig. 15) articulé en B et maintenu dans une position fixe par un buttoir C et un ressort ED. De cette manière, ce levier AB peut opérer son contact avec le buttoir M et s'échapper ensuite après une flexion suffisante. Si le buttoir M est en fer, et si levier AB est fortement aimanté, l'adhérence magnétique assurera le contact des deux pièces et empêchera les petites vibrations qui pourraient se produire. Pour éviter les effets d'oxydation de l'étincelle assez forte échangée entre le fer et l'acier, j'adapte à l'extrémité du levier AB un petit fil de platine IJ plié de telle manière qu'il peut rencontrer la partie supérieure du buttoir M, laquelle est garnie d'une lame de platine.

La fig. 16 représente une autre disposition de conjoncteur établi dans le même but que le conjoncteur dont nous venons de parler. AB est le levier moteur ; CD est un levier métallique articulé en D et portant en H un buttoir de platine. En face de ce buttoir se trouve une lame de ressort JR en rapport avec l'une des branches du courant.

Enfin un ressort C S, appuyé contre une cheville O, tend à ramener constamment le levier CD contre le buttoir rigide M.

Quand le levier AB entre en mouvement, il pousse le levier CD, et celui-ci, par son buttoir H, ferme le courant jusqu'à ce que le levier A B ait échappé.

Quand le contact de la lame flexible du conjoncteur, au lieu de s'opérer sur des buttoirs placés devant l'extrémité du levier moteur, doit se faire sur des buttoirs au-dessus desquels passe ce levier moteur, et que la distance entre ce levier et ces buttoirs est trop rapprochée, on se trouve dans la nécessité, pour que la lame flexible ait une élasticité suffisante, d'adapter au levier une pièce AB (fig. 17) sur laquelle est fixée cette lame BC, et de pratiquer à travers le levier un trou DE assez large pour que la lame BC puisse effectuer librement tous ses mouvements. Avec cette disposition, le buttoir M O doit être de forme triangulaire (fig. 17 bis). Il est métallique, si le mouvement du levier s'opère toujours dans le même sens, mais il doit être en matière isolante et recouvert d'une lame de platine d'un côté seulement dans le cas contraire.

Souvent les conjoncteurs sont appelés à fournir une fermeture de courant constante, quoique, soumis eux-mêmes à un mouvement quelconque soit rectiligne, soit circulaire. Une simple lame de ressort, munie d'une semelle métallique pour empêcher l'usure trop prompte due au frottement, peut, comme on le comprend aisément, résoudre le problème, mais ce moyen est très-imparfait. Le meilleur système à employer dans ce cas est celui des frotteurs à piston représentés fig. 18. Ces frotteurs consistent dans des tubes de cuivre ou de fer dans lesquels peuvent se mouvoir librement des tiges métalliques BC. Un ressort à boudin AB, placé au fond de chacun de ces tubes, appuie sur la tige qui s'y trouve introduite, et la sollicite

toujours à frotter fortement sur la lame DI à laquelle aboutit une branche du courant.

Les conjoncteurs peuvent être employés pour la réunion d'un certain nombre d'éléments de pile en batterie. La fig. 19 représente un conjoncteur de ce genre ; il consiste dans autant de séries de doubles lames de cuivre articulées qu'il y a d'éléments de pile à réunir. Ces lames sont légèrement bombées vers le milieu afin de leur donner du ressort, et sont disposées de manière que les lames impaires recouvrent les lames paires. Ces dernières sont en communication avec les pôles négatifs des éléments de la pile, et les autres correspondent aux pôles positifs ; il faut seulement que la lame en rapport avec le pôle positif d'un élément soit celle qui appuie sur la lame négative de l'élément précédent.

Par ce moyen on peut réunir en tension tel nombre d'éléments que l'on désire sans avoir à approcher de la pile.

Pour pouvoir réunir ces éléments en quantité il suffit d'adapter au conjoncteur deux séries de bandes de cuivre A B C D, E F G H terminées en A et en H par deux boutons d'attache. En poussant sur la bande extérieure A B C D tous les ressorts pairs, et sur la bande intérieure tous les ressorts impairs, on réunit les éléments de la pile en quantité. Ce système de conjoncteur est très-commode pour les expériences scientifiques.

Il est facile de comprendre que tous les conjoncteurs ou disjoncteurs que nous avons désignés précédemment comme étant susceptibles d'être mis en fonction par le doigt, peuvent être appliqués à telle action mécanique qui exercera le même effet. Ainsi, l'interrupteur de la fig. 6 pourra être adapté à un mouvement de va-et-vient horizontal comme celui d'un pendule¹ ; l'interrupteur de la fig. 5, au lieu de

1. Ce système a été employé par M. Foucault pour l'horlogerie électrique.

porter un bouton, pourra porter une traverse qui sera soulevée par un rayon cylindrique adapté à une roue, comme on le voit fig. 20 ¹; enfin l'interrupteur de la fig. 1 pourra être pressé par une vis à volant mise en mouvement sous une influence quelconque, laquelle vis pourra remonter après être descendue et après avoir opéré un contact excessivement énergétique, comme dans les balanciers des presses à timbre ².

Il est quelquefois nécessaire, dans certaines applications de l'électricité, notamment dans les applications électromédicales, de faire réagir sur les courants un interrupteur dont les vibrations soient faites mécaniquement et susceptibles d'être réglées à volonté. M. Pulver-Macher a imaginé dans ce but un appareil très-ingénieux dont nous allons faire la description.

Il fait partie d'une petite boîte d'horlogerie, fig. 8 et 9 page 255, à laquelle est adapté un manche. Ce manche sert de remontoir, et à cet effet il se termine par une roue à dents de côté, nichée dans l'épaisseur d'un des côtés de la boîte, et dont on voit quelques dents au-dessous du crochet W. Cette roue à dents de côté engrène avec une première roue à dents droites fixée en dehors sur le côté droit de la boîte, laquelle roue engrène à son tour avec une seconde roue fixée sur l'axe du barillet.

Le mouvement d'horlogerie se compose seulement de trois mobiles, mais le troisième porte une roue à rochet qui s'engrène avec une vis sans fin dont l'axe est terminé par un volant. C'est exactement le même mécanisme que celui d'un tourne-broche ordinaire.

Le volant de ce tourne-broche porte transversalement, suivant l'un de ses diamètres, une petite tige *t* (fig. 9), lé-

1. Ce système a été employé par moi pour mon calendrier perpétuel.

2. Ce système a été en partie employé par M. Bellemare dans son interrupteur kilométrique des chemins de fer.

gèrement poussée en dehors par un ressort-boudin et terminée par une petite languette que peut rencontrer l'extrémité d'une lame de ressort y fixée sur une platine isolante.

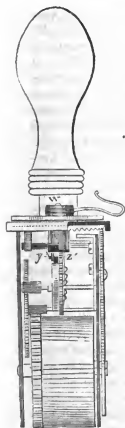


Fig. 8.

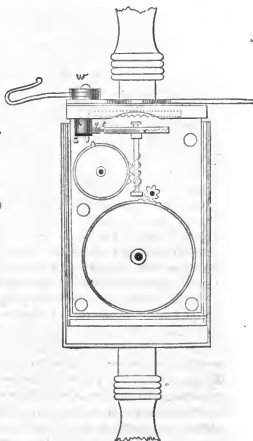


Fig. 9.

Ce ressort peut être abaissé plus ou moins par une excentrique V composée mi-partie de cuivre, mi-partie d'ivoire.

Dans les deux figures les parties noires représentent les parties métalliques. Cette excentrique peut être tournée à gauche ou à droite par un levier isolant qui est en dehors de la boîte ; quand elle est tournée tout à fait vers le côté gauche de la fig. 8, c'est la partie de cuivre qui appuie sur la lame de ressort *y* ; mais quand elle n'est qu'à moitié tournée, ce ressort n'est en contact qu'avec la partie isolante. En revanche, une pointe d'acier *A* (fig. 8) soudée sur la partie métallique de cette même excentrique se trouve mise à portée d'une seconde lame de ressort portée par la roue à rochet qui commande le volant. Ce sont ces deux lames de ressort ainsi commandées par une même excentrique qui constituent l'interrupteur, et la communication électrique se fait, d'une part, par la boîte de cuivre de l'appareil lui-même, d'autre part, par le crochet *W* qui est en relation avec la partie métallique de l'excentrique.

Pour comprendre le jeu de ce mécanisme il suffit de considérer que quand l'excentrique est entièrement tournée vers la gauche de la fig. 8, la pression exercée sur la lame du ressort *y* (fig. 9) est à son minimum, et par conséquent elle n'est qu'à peine effleurée par la languette *t* du volant. Celui-ci peut donc atteindre immédiatement son maximum de vitesse, et comme le courant se trouve alors transmis en *y*, les interruptions du courant sont extrêmement accélérées. A mesure qu'on tourne l'excentrique le ressort appuie de plus en plus sur la languette du volant et fait de plus en plus obstacle à son mouvement ; alors les interruptions se ralentissent successivement ; mais comme ce ralentissement ne serait pas suffisant, le second interrupteur établi sur la roue à rochet réagit à la suite du premier et fournit des interruptions aussi lentes qu'on peut le désirer. En achevant de tourner l'excentrique on finit par enrayer totalement le mouvement du volant.

Comme diminutif de l'interrupteur précédent, M. Pulver-

Macher a imaginé un autre appareil excessivement simple qui fonctionne sous l'influence d'un tremblement ou d'une trépidation quelconque, par exemple sous l'influence des commotions que l'on peut recevoir d'un courant de chaîne électrique ainsi interrompu.



Fig. 40.

Ce petit interrupteur consiste dans un tube de verre garni intérieurement à ses deux extrémités de deux douilles de cuivre doré *b*, *b'* dans chacune desquelles est vissé un bouchon métallique *d* que l'on met en rapport avec le circuit. Ce bouchon porte un ressort-boudin très-flexible *a* terminé en *c* par une étoile métallique dorée et hérissée de nombreuses pointes : cette étoile est placée de manière que les pointes dont elle est armée soient à une très-petite distance des parois de la douille au milieu de laquelle elle est plongée. Il résulte de cette disposition que le moindre mouvement suffit pour opérer une série de contacts entre ces pointes et la douille, et, par suite, une série d'interruptions et de fermetures du courant.

COMMULATEURS.

Les commutateurs sont des organes électriques à l'aide desquels on peut renvoyer un courant d'un circuit dans un autre.

Sous ce point de vue la plupart des interrupteurs que nous avons décrits précédemment sont susceptibles d'être considérés comme commutateurs, particulièrement ceux représentés fig. 8, 11, 12, 15, 16, 17, 18, car les lames ou les buttoirs qui sont mis en contact successivement avec une même pièce mobile, peuvent être en rapport métallique avec des circuits différents ; mais les commutateurs que nous allons maintenant étudier sont plus complexes, plus mécaniques et plus susceptibles d'application dans les appareils.

La fig. 21 (Pl. III) représente un des commutateurs les plus simples que l'on puisse adapter à un mouvement circulaire ; mais il ne peut réagir que sur deux circuits, et ce n'est, à proprement parler, qu'une complication de l'interrupteur à excentrique représenté fig. 10.

Il se compose de deux excentriques A B, C D montées sur le même arbre ou sur deux noyaux différents, et qui viennent l'une après l'autre rencontrer deux lames de ressort B I, E G en rapport avec les deux circuits. L'un des pôles de la pile étant en rapport avec l'axe X Y, le courant se trouve complété à travers l'un ou l'autre de ces circuits après chaque demi-révolution du moteur. Si les noyaux B K, H M, sur lesquels sont fixées les excentriques, étaient isolés, un troisième ressort O P mettrait ces excentriques en rapport avec le courant.

La fig. 22 montre un commutateur complexe à roues dentées réagissant sur deux circuits autant de fois par révolution de l'axe X Y qu'il y a de dents découpées sur les

deux roues. Ces dents, comme on le voit sur la figure, sont alternées dans les deux circonférences métalliques, mais elles sont disposées de telle manière à l'égard les unes des autres qu'elles dépassent en largeur les vides qui leur correspondent; en d'autres termes, les vides dans les deux circonférences sont plus petits que les pleins. Il résulte de cette disposition que le courant électrique ne se trouve jamais interrompu et fermé brusquement, car il se dérive au moment des permutations dans les deux circuits à la fois, ce qui est un grand avantage dans certains cas, particulièrement dans les électro-moteurs. La disposition des ressorts frotteurs qui sont en rapport avec les circuits est d'ailleurs la même que dans la fig. 14.

Quand on veut opérer mécaniquement l'effet de transmutation produit à la main à l'aide de l'interrupteur représenté fig. 3, on peut disposer le commutateur comme on le voit fig. 23. Ce commutateur consiste dans une roue épaisse de caoutchouc durci ou de bois sur la circonférence de laquelle sont incrustées les plaques qui doivent être en rapport avec les différents circuits sur lesquels on doit agir. Ces plaques sont reliées par des fils à travers le corps même de la roue avec d'autres plaques A B, C D, etc., placées sur les deux joues de cette roue (voir fig. 24). Sur ces dernières plaques appuient des ressorts frotteurs E D, G B, etc., qui sont disposés de manière que la roue en tournant ne leur présente jamais qu'une plaque à la fois. Enfin un dernier ressort H I appuyant sur la circonférence de la roue peut rencontrer les différentes plaques qui s'y trouvent incrustées, et complète ainsi successivement les différents circuits à mesure que la roue tourne. Ce système de commutateur a été utilisé par moi à l'explosion électrique des mines.

Le commutateur représenté fig. 25 et 26 est plus complexe dans les fonctions qu'il doit remplir et dans sa construction;

il a pour but non-seulement d'opérer un certain nombre de fermetures et d'interruptions de courant dans un circuit, mais encore de faire en sorte que le mouvement accompli dans un sens, par exemple de gauche à droite, réagisse sur un circuit, tandis que le mouvement rétrograde (de droite à gauche) réagira sur un deuxième circuit. Ce système de commutateur peut, d'ailleurs, être aussi bien appliqué à un mouvement rectiligne qu'à un mouvement circulaire.

Supposons, pour fixer les idées, qu'un axe vertical AB (fig. 26) soit appelé à réagir par l'intermédiaire d'un levier CD armé de deux buttoirs EF, GH sur deux circuits en rapport avec deux circonférences interrompues OP, QR (fig. 25), de telle manière que le mouvement du levier CD , exécuté de gauche à droite, produise son effet sur le circuit de la circonférence QR , tandis que ce même mouvement accompli de droite à gauche devra réagir sur le circuit de la circonférence OP . C'est le cas d'une girouette dont on voudrait faire reproduire électriquement le mouvement à distance par l'intermédiaire seul de deux électro-aimants. Voici comment le commutateur serait alors disposé :

Les circonférences OP, QR (fig. 25), divisées en huit secteurs pour servir d'interrupteur et reproduire par là un nombre donné de fermetures de courant pour chaque révolution de l'axe AB portent un rebord vertical MN, TU (fig. 26) qui correspond à chaque secteur, mais qui se prolonge d'un côté seulement de ces secteurs en se recourbant, comme on le voit dans la fig. 25 en SIK . Tous ces rebords SIK de la circonférence OP sont disposés symétriquement les uns par rapport aux autres; mais ceux de la circonférence QR sont disposés en sens inverse. Les secteurs des deux circonférences sont d'ailleurs en rapport avec le même pôle de la pile, mais font partie d'un circuit différent, suivant la circonférence à laquelle ils appartiennent; de

sorte que, à proprement parler, une circonférence possède un circuit et l'autre circonférence un autre circuit.

Les buttoirs EF, GH du levier CD qui doivent agir sur les circonférences au lieu d'être rigides, sont mobiles dans le sens horizontal par l'intermédiaire d'un noyau métallique EG qui glisse dans une coulisse XZ. Ce noyau est sans cesse rappelé vers l'axe AB par un ressort boudin EY que l'on peut tendre à volonté au moyen d'un treuil Y. Enfin le buttoir extérieur GH mobile lui-même dans le noyau EG, sur une longueur de deux millimètres seulement, est poussé en dehors par une lame de ressort VL. Le second pôle de la pile est en rapport avec l'axe AB et par conséquent avec les buttoirs EF, GH.

Le commutateur étant ainsi disposé, voici ce qui arrive quand l'axe AB entre en mouvement: si l'arbre AB tournant de gauche à droite, le premier buttoir A (fig. 25) rencontre en premier lieu le rebord de la circonférence intérieure, le courant se trouve établi dans le circuit de cette circonférence, et le second buttoir B passe latéralement au-dessus du rebord de la circonférence extérieure sans le toucher. Tant que le mouvement de l'arbre moteur s'effectuera dans l'angle correspondant à ces rebords, le courant restera maintenu dans le même circuit; mais si, au contraire, les buttoirs ayant été entraînés au delà de ces rebords, reviennent en arrière, c'est le buttoir B qui, le premier, rencontrera la circonférence extérieure et établira le courant dans le circuit correspondant. En même temps le buttoir A se trouvera repoussé au-dessous du rebord de la circonférence intérieure.

Pour peu qu'on analyse les fonctions de ce mécanisme, on ne tarde pas à se rendre compte des motifs qui ont nécessité l'emploi des ressorts YE, VL pour les buttoirs A et B: l'un de ces ressorts sert en effet à assurer le contact du buttoir A (EF) avec la circonférence QR, tandis que

l'autre assure ce même contact entre le buttoir B (GH) et la circonférence extérieure.

On voit donc qu'à l'aide de ce commutateur toutes les fermetures du courant opérées dans un même sens ont action sur un même circuit, tandis que toutes les fermetures de ce même courant, faites dans le sens opposé, correspondent à un autre circuit.

On a cherché longtemps un système de commutateur au moyen duquel un courant pût être renvoyé d'un circuit dans l'autre sans qu'il y ait étincelle, c'est-à-dire rupture brusque du courant au moment de la permutation. Nous avons déjà vu, fig. 22, un système de commutateur disposé dans ce but; mais bien que par ce système le courant se trouve divisé au moment de la permutation, la rupture brusque que l'on voudrait éviter ne s'en opère pas moins, seulement elle ne s'exerce plus que sur un courant affaibli de moitié. Par un système de commutateur particulier M. Pulver-Macher est parvenu à résoudre à peu près le problème.

Admettons, pour la facilité de la démonstration du principe de ce commutateur, que deux piles, que nous supposons être des piles de Wollaston, soient disposées en A et en B (fig. 6, pl. IV), des deux côtés d'une balance bascule CDE; admettons encore que chaque pile réagisse sur un circuit particulier et que l'effet mécanique produit par ces courants fasse incliner, en temps opportun, les branches DO, OE auxquelles seront suspendus les couples zinc et cuivre des deux piles. Quand l'une de ces branches s'inclinera, la pile qui lui correspond se trouvera chargée successivement à mesure que l'autre pile se déchargera, et lorsque l'immersion complète des plaques zinc et cuivre de la pile mise en activité aura eu lieu, la pile opposée sera complètement déchargée. La transmutation du courant d'un circuit dans l'autre se sera donc opérée ainsi successivement sans qu'il y ait eu interruption brusque du courant.

Ce système, tel que nous venons de le décrire, ne pourrait pas, comme on le comprend aisément, être réalisé pratiquement ; mais en le combinant de la manière suivante, il peut fournir de grands avantages.

Imaginons incrusté sur une planche de bois un cercle de charbon médiocrement conducteur, ou mieux encore, parce qu'on peut en régler à volonté le degré de conductibilité, un cercle de poix de charbon de terre imprégnée de plombagine ; supposons roulant sur ce cercle demi conducteur deux galets C, D (fig. 3), adaptés aux extrémités d'un levier CD fixé sur un arbre vertical AB ; enfin admettons que cet arbre AB, mis en rapport avec le courant, soit animé d'un mouvement de rotation et que les points C et D, E et F du cercle de plombagine, qui seront reliés ensemble deux à deux, soient les points où aboutissent les fils des deux circuits S et R à travers lesquels il s'agit de distribuer alternativement le courant. On comprendra aisément qu'avec cette disposition le circuit S possédera le courant avec son maximum d'énergie quand les galets C et D se trouveront en C et en D ; mais ce courant diminuera successivement d'intensité à mesure que les galets s'éloigneront ; et si le cercle de plombagine offre une résistance suffisante, il arrivera un moment (quand les galets seront en G et en H) où il sera complètement annihilé. Au delà de ces points, le courant commencera de nouveau à se rétablir, mais cette fois à travers le circuit R, et il atteindra son maximum quand les galets C et D seront arrivés en E et en F.

Par une autre disposition indiquée fig. 4 et 5, M. Pulver-Macher est parvenu non-seulement à réaliser l'effet précédent, mais encore à faire profiter tour à tour l'un des deux circuits de l'affaiblissement de l'autre. Dans cette disposition, les points C et D (fig. 4) de la circonférence de plombagine sont en rapport avec les deux pôles de la pile, et l'axe vertical AB qui porte les axes des galets, cette fois

au nombre de quatre, est enveloppé dans deux étuis métalliques isolés l'un de l'autre, et de l'axe lui-même, par des douilles d'ivoire. Ces deux étuis sont coupés à des hauteurs différentes et apparaissent l'un en G, l'autre en H (fig. 5). Sur ces étuis appuient deux ressorts IG, HJ mis en rapport avec l'un des circuits, tandis que le second circuit, ayant ses points d'attache en L et en M, est en rapport direct avec les pointes sur lesquelles pivote l'axe AB qui est coupé lui-même en deux par un cylindre d'ivoire.

Quand les galets C et D sont en contact avec les points C et D où aboutissent les pôles de la pile, le courant est à son maximum dans le circuit qui correspond aux boutons L et M ; mais il est au minimum dans l'autre circuit. En effet, le courant entre directement dans le galet C, passe par la pointe de l'axe A, entre dans le circuit en L, en ressort en B, entre dans la partie supérieure de l'axe AB, et revient à la pile par le galet D. Dans le second circuit, au contraire, les galets E et F qui doivent recevoir le courant sont à leur maximum d'éloignement des points C et D, et bénéficient d'autant moins de la demi-conductibilité de la circonférence de plombagine qui pourrait, jusqu'à un certain point, les mettre en relation avec les pôles de la pile, que celle-ci est plus étroite et que le courant est lui-même absorbé par le premier circuit à travers lequel sa dérivation est plus facile.

A mesure que l'arbre AB tournera et que les galets C et D s'éloigneront des points C et D les galets E et F s'en rapprocheront, de sorte que le circuit en rapport avec les premiers présentera une résistance de plus en plus grande, tandis que l'autre circuit aura la sienne diminuée dans la même proportion ; et lorsque les galets E et F se trouveront en C et en D, ce sera le circuit qui leur correspond qui sera à son maximum. On voit donc qu'avec cette disposition du commutateur aucune interruption n'est faite sur le courant,

et que toute l'électricité produite par la pile est utilisée.

M. Pulver-Macher prétend qu'avec ce système de commutateur on augmente beaucoup la puissance mécanique des électro-aimants. Il compare l'effet produit dans cette circonstance à celui qui se manifeste dans les machines à vapeur à détente, dans lesquelles la vapeur, après avoir atteint sous le piston son maximum de pression, a le temps de se détendre avant d'être absorbée. Je ne sais jusqu'à quel point cette hypothèse doit être acceptée.

COMMULATEURS A RENVERSEMENT DE POLES.

Nous avons pu voir, par les effets si importants qu'on obtient des électro-aimants à armatures aimantées, tout le parti qu'on peut tirer des inversions de courants dans les applications de l'électricité. Pour obtenir mécaniquement ces inversions on a disposé de petits appareils appelés commutateurs à renversement de pôles qui, au moyen d'un simple mouvement opéré sur eux, peuvent changer le sens du courant sans qu'on ait besoin pour cela de toucher aux points d'attache de la pile avec son circuit.

Les commutateurs à renversement de pôles peuvent être combinés de mille manières différentes : suivant le mouvement qui doit agir sur eux, suivant le mode de communication électrique qu'on veut employer, enfin suivant qu'on les fait à la fois interrupteurs et commutateurs.

Quand il s'agit de renverser à la main le sens d'un courant, le commutateur de Ruhmkorff est le plus simple et le meilleur qu'on puisse choisir. Il est représenté en coupe, fig. 7 (pl. IV).

Il se compose d'un cylindre d'ivoire soutenu sur deux équerres en cuivre par deux tourillons E et G fixés solidement aux deux extrémités de son axe. Sur ce cylindre se trouvent adaptées deux lames métalliques AC, BD légère-

ment convexes, qui sont fixées sur l'ivoire par deux vis d'inégale grosseur. La plus grosse de ces vis, A ou B, traverse l'ivoire et vient se visser dans le tourillon qui lui correspond, l'autre vis reste noyée dans le corps de l'ivoire ; enfin les équerres de cuivre servant de support au cylindre sont en communication avec des boutons d'attache O et M, mis en rapport avec le circuit. Les pôles de la pile aboutissent à deux autres boutons d'attache en communication avec deux ressorts R, R' placés des deux côtés du cylindre d'ivoire. Voici alors ce qui se passe quand, avec le bouton P, on tourne le commutateur.

Si la lame BD touche le ressort R' en rapport avec le pôle positif de la pile, le courant va de R' en BD, suit la vis B, entre dans le tourillon E, descend par l'équerre KL, traverse le circuit en entrant par le bouton M et en ressort par le bouton O ; il rencontre alors l'équerre H, entre dans le tourillon G, suit la vis A et va regagner le pôle négatif par la lame AC et le ressort R.

Si la lame BD, au contraire, touche le ressort R, le courant entre par la lame AC et ressort par la lame BD. Donc le courant est bien renversé quand on incline le commutateur dans un sens ou dans l'autre.

Le commutateur représenté, vu en dessous (fig. 8), et construit par M. J. Duboscq, est également très-simple, et peut être employé dans les mêmes circonstances que celui de Ruhmkorff. Il se compose d'un disque d'ivoire sur lequel sont fixées quatre lames de cuivre A, B, C, D, découpées comme on le voit sur la figure, et communiquant deux à deux, savoir : la plaque A avec la plaque C, et la plaque D avec la plaque B. Ce disque est mobile sur un pivot O qui le traverse par son centre, et qui est fixé sur une planche de bois. Quatre lames de ressort aboutissant à quatre boutons d'attache E, F, G, H, et terminées par de petits cylindres I, J, K, L, sont fixées sous la planche-support ; mais ces petits

cylindres I, J, K, L traversent cette planche et appuient fortement sur les plaques métalliques du disque. Ces plaques, bien entendu, sont tournées du côté de la planche-support et sont représentées dans la figure, vues en dessous, c'est-à-dire dans l'hypothèse que la planche est enlevée. Le dessus du disque d'ivoire est représenté fig. 12, et les flèches qui s'y trouvent gravées indiquent dans quel sens circule le courant quand on le tourne à gauche ou à droite. Le jeu de cet appareil se devine aisément. Supposons que les deux pôles de la pile aboutissent aux colonnes F et H. Dans la position de la fig., F étant le pôle positif, le courant ira de F à la plaque A, et de celle-ci au bouton G, par l'intermédiaire de la plaque C. Du bouton G il parcourra le circuit et reviendra, par le bouton E, à la plaque D, puis à la plaque B et de là au pôle négatif.

Admettons maintenant que le disque soit tourné d'une quantité donnée qui ne peut être outre-passée à cause de l'arrêt M interposé dans la rainure MN; la lame FL sera transportée sur la plaque D, sur laquelle continuera à appuyer la lame EK, et les deux autres lames se trouveront en communication l'une avec la plaque A, l'autre avec la plaque C. Le courant ira donc de F en E, pénétrera dans le circuit, et reviendra à la pile par les plaques C et A en communication avec les lames IG, JH. Or, comme dans la première position du commutateur le courant, au lieu de rentrer à la pile par la plaque C, en sortait par cette même plaque, on est en droit de conclure que le renversement du courant s'est bien opéré.

Le commutateur de la fig. 9 est un commutateur à bascule; il peut être mis en action sous une influence électromagnétique, et en conséquence on peut l'employer dans les appareils électro-magnétiques eux-mêmes. Voici en quoi il consiste : sur une planche qui sert de support à l'appareil sont incrustées quatre plaques A, B, C, D reliées

entre elles deux à deux, savoir : la plaque A avec la plaque C et la plaque B avec la plaque D ; à portée de ces plaques se trouve fixée une bascule E G H I pivotant en T et portant à ses deux extrémités deux lames de ressort E G, H I ; ces lames sont mises en rapport permanent avec les boutons d'attache P et O par des fils extensibles (roulés en boudins) G K P, H L O. Enfin les plaques A et D sont mises en rapport avec deux autres boutons d'attache R, S qui doivent être mis en communication avec le circuit.

Les pôles de la pile étant fixés en P et en O, voici ce qui arrive quand la bascule est inclinée dans l'un ou l'autre sens.

Quand la bascule est inclinée de manière que les plaques A et D soient touchées en même temps, le courant entrant par le bouton P traverse la lame G, et par la plaque A pénètre dans le circuit, d'où il revient à la pile par le bouton S, la lame D, le ressort I H et le bouton O ; il traverse donc le circuit de R en S.

Quand, au contraire, la bascule est inclinée dans le sens opposé, le courant entre par les plaques B et D et revient par les plaques A et C ; par conséquent il traverse le circuit de S en R¹.

Le commutateur de la fig. 2 est celui qui a été adopté pour les télégraphes anglais. Il fonctionne, à ce qu'il paraît, de la manière la plus satisfaisante.

Il est formé d'un cylindre en ivoire O tournant autour de son axe (sous l'influence d'une manivelle OM), et armé de deux chevilles I et K en cuivre. Ces chevilles, ainsi que les systèmes de ressorts A B C D, E P G O, R S T U, ne sont pas sur le même plan. L'une I est destinée à agir sur les ressorts A B, C D pour les écarter à volonté, l'autre K doit agir sur les ressorts S R, T U.

1. J'ai employé ce commutateur dans plusieurs de mes appareils.

Les pôles de la pile sont en communication avec les ressorts PE, GO, et ceux-ci, appuyés sur deux douilles de cuivre qui terminent les extrémités du cylindre, sont reliés métalliquement aux chevilles I et K. Quand l'appareil ne fonctionne pas, les ressorts AB, CD touchent les appendices de soutien L, M; mais si on tourne la manivelle OM dans un sens ou dans l'autre, par exemple de gauche à droite, comme l'indique la figure, alors l'appendice L quitte le ressort AB; le pôle P transmet le courant à ce ressort par l'intermédiaire de la cheville I, et la cheville K complète le circuit avec le ressort TU. En effet, en supposant que le ressort PE soit en rapport avec le pôle positif de la pile, le courant marche de PE en I par la douille Q et la cheville en communication avec cette douille; il entre dans le circuit par le ressort AB, et après l'avoir parcouru il revient au ressort TU par la communication DU, puis il retourne à la pile par la cheville K, la douille Q' et le ressort GO.

Quand la manivelle est tournée de manière que ce soit le ressort CD qui soit soulevé, la cheville K touche le ressort RS, et le courant entre dans le circuit par le ressort CD, pour en ressortir par le ressort RS, après quoi il revient à la pile par la cheville K et le ressort GO.

Dans la fig. 1 est représenté un commutateur ayant pour effet de fermer constamment, à l'état normal, un courant à travers un circuit, et de renverser le sens de ce courant à travers ce même circuit au moment où une action mécanique quelconque vient à s'exercer sur lui. Ce commutateur se compose de six lames de ressort AB, CD, EF, GH, IJK, LMN fixées sur une plaque d'ivoire et disposées de manière que deux d'entre elles, AB, CD, réunies par une traverse d'ivoire OP appuient à l'état normal sur les ressorts IJK, LMN placés au-dessous. Les deux autres lames EF, GH sont, au contraire des précédentes, placées au-dessus des lames AB, CD. Enfin les pôles de la pile aboutissent, l'un en H et

en K, l'autre en F et en M, tandis que les extrémités du circuit sont en rapport avec les plaques AB, CD.

A l'état normal le courant passe donc à travers le commutateur de K en E, de E en AB, de AB dans le circuit, et revient par CD, G M N, EF à la pile. Mais quand le rayon cylindrique QR de la roue motrice Q vient à passer sous la traverse OP, les lames AB, CD sont soulevées et viennent toucher les lames EF, GH; alors le courant marche de H en G, de G en CD, entre dans le circuit en D, en ressort par B et retourne à la pile par les ressorts AB et EF. Dans ce dernier cas, le courant marche dans le circuit de D en B, tandis que dans l'autre position des ressorts il marche de B en D. J'ai employé ce genre de commutateur dans mon calendrier électro-magnétique.

Le commutateur représenté fig. 10 est destiné à opérer une fermeture de courant momentanée, avec renversement de pôles; il a été combiné par M. Mirand. Il se compose de deux lames de ressort AB, CD fixées sur une planche en bois, l'une en B, l'autre en E. Ces deux lames sont rivées en G et en C à un bouton d'ivoire, à l'aide duquel on peut les faire fléchir et les abaisser quand on y applique le doigt. Au point A la lame AB appuie contre un buttoir d'argent fixé sous une petite équerre métallique AH. En D la lame CD est vissée sur un second bouton d'ivoire. Enfin, trois lames de ressort à contact d'argent KG, CI, LD sont placées sous les lames AB, CD de manière que celles-ci étant abaissées elles puissent toutes se toucher, comme on le voit fig. 11, pour les lames KG, CI.

La lame AB communique avec le bouton d'attache O; la lame CD correspond au bouton N; le ressort LD est en rapport avec le bouton M, et l'équerre HA communique d'un côté avec le bouton P, de l'autre avec le ressort CI, tandis que le ressort KG est uni au ressort LD. Les boutons O et N sont les boutons de la pile, et P et M ont ceux du

circuit. Voici comment s'opère le renversement du courant dans ce système :

Quand on appuie le doigt sur le bouton d'ivoire GC, les ressorts KG, CI sont mis en contact avec les lames AB, CD, et le contact de la lame AB avec l'équerre AH est rompu. Le courant va donc du bouton positif au ressort KG, de celui-ci au ressort LD et entre en M dans le circuit, d'où il ressort par le bouton P pour revenir à la pile par l'équerre HA, le ressort IC, la lame CD et le bouton N.

Quand, au contraire, on appuie sur le bouton d'ivoire D, le courant va de O en B, de B en A, de A en P, de P, à travers le circuit, en M, de M en LD, de D en E, de E en N : ce qui réalise bien l'effet voulu.

Au premier abord ce commutateur paraît compliqué, mais il est d'une si grande facilité d'exécution, qu'il est, par le fait, le plus économique des commutateurs dont nous avons jusqu'à présent parlé. Il n'y a en effet aucun ajustement de pièces à opérer, et tout se fait avec des fils et des lames de ressort en cuivre mince. L'auteur de cet appareil aurait pu, pour plus de simplicité, supprimer l'équerre AH, mais elle économise un fil de communication quand, dans l'application, on emprunte un fil à d'autres appareils mis en rapport avec la pile qui doit agir sur ce commutateur ¹.

Dans la fig. 12 est représenté un commutateur à renversement de pôles combiné à un commutateur simple. Ce système peut être employé dans le cas où l'on veut expérimenter alternativement sur deux circuits différents, et renverser à volonté le sens du courant dans l'un ou l'autre de ces circuits. Le commutateur à renversement de pôles est celui de J. Duboscq, représenté fig. 8, et le commu-

1. M. Mirand emploie ce système de commutateur pour certains appareils accessoires de ses sonneries électriques.

tateur simple est celui de la fig. 8, pl. III que nous avons déjà décrit.

Dans ce système à double commutateur, les deux circuits sont mis tous les deux en rapport avec le bouton d'attache S, tandis que le ressort commutateur A correspond au bouton R. Les plaques B et C sont ensuite mises chacune en relation avec un des circuits, et les rhéophores de la pile aboutissent aux boutons P et O.

Au moyen du commutateur à renversement de pôles E, le courant peut être renversé à volonté aux points S et R, et au moyen du ressort A, ce courant, dans quelque sens qu'il soit dirigé, peut être envoyé soit à travers le circuit SB, soit à travers le circuit SC.

Le commutateur de la fig. 13 (pl. IV) se prête admirablement aux mouvements de va-et-vient. Il se compose d'une planche carrée HQTL portant sur ses côtés deux rebords métalliques interrompus en EG, JK. Ces parties vides, du reste, sont remplies par de l'ivoire, et les parties métalliques communiquent diagonalement entre elles. Quatre lames de ressort AO, SB, CP, DR appuient sur ces rebords de la planche, et celle-ci, mobile sur une tringle MN, peut être poussée d'un côté ou de l'autre jusqu'à ce qu'elle soit arrêtée par deux obstacles M et N qui en limitent la course.

Quand la planche est appuyée en N, le courant est envoyé dans un certain sens; quand, au contraire, elle est appuyée en M, le courant est renvoyé dans le sens opposé.

Pour comprendre ce renversement, il suffit d'observer que, dans la position de la figure, le courant, entrant par le bouton P, traverse la lame PC, le rebord métallique IJ, le fil JU, la lame SB, pénètre dans le circuit et en ressort par le bouton R pour regagner la pile par la lame DR, le rebord KL, le fil EV, le rebord EF et la lame AO. Quand la planche est repoussée du côté opposé, les quatre ressorts communiquent entre eux deux à deux, de sorte que

le courant, entrant toujours par le bouton P, passe de P en R et de R en S à travers le circuit et de S en O.

La fig. 14 représente un commutateur à renversement de pôles combiné à un interrupteur complexe. Pour en bien comprendre le but, supposons qu'en tournant la manivelle AB on veuille, à l'aide d'un ressort RC frottant contre une série de chevilles DI disposées circulairement, obtenir une série de fermetures et d'interruptions successives dont le nombre doit se trouver limité par l'abaissement d'une bascule FEI qui, en soulevant la cheville DI, vient faire obstacle au mouvement de AB par suite de sa rencontre avec une traverse GU fixée sur AB. Supposons encore qu'on veuille que cet arrêt ait pour effet de déterminer une fermeture de courant en sens contraire des fermetures normales et s'effectuant au lieu et place de la fermeture qui aurait eu lieu si la bascule n'avait pas été soulevée. Voilà bien un système de commutateur à renversement de pôles combiné à un interrupteur complexe.

Pour résoudre le problème, deux petits cylindres isolants N et V ont été placés sous les extrémités de chaque bascule, et, au-dessous de ces petits cylindres, on a disposé des lames de ressort ML, KJ, placées à portée de petits buttoirs O et P en rapport avec la pile. Les communications électriques étant établies, comme on le voit, sur la figure, voici ce qui a lieu quand on tourne la manivelle AB, et qu'on l'arrête en abaissant une des bascules FEI :

Le ressort RC, étant en rapport avec le pôle positif de la pile, envoie, à chaque contact opéré avec les chevilles DI, le courant à travers la bascule FEI. Ce courant passe par le support Z, arrive au bouton d'attache par le fil XZ, et de là pénètre dans le circuit d'où il ressort par le bouton Y, pour se rendre à la pile par le fil YK, le ressort KJ et le buttoir P. Toutes les fermetures du courant opérées par le ressort RC se feront donc avec un courant dirigé de X en

Y. Quand on appuiera la main sur la bascule FEI, la cheville DI sera soulevée et arrêtera la traverse rigide GH; le ressort RC appuiera sur le cylindre isolant V, et le courant se trouvera dirigé de Y en X à travers le circuit.

En effet, dans cette position de la bascule FEI, le courant ne peut plus passer par le ressort RC, car le ressort KJ ne touche plus le buttoir P, et le circuit que nous avons suivi précédemment se trouve interrompu. Mais, en revanche, le ressort ML touche le buttoir O, et c'est par cette voie que le courant peut circuler. Effectivement le courant, entrant par O et ML, passe en Y par le fil YL; après avoir traversé le circuit dans le sens de YL, il revient par X au support de la bascule Z et passe par la cheville DI dans la traverse GH; de là il suit l'axe A Q et se rend à la pile par la plaque Q. J'ai employé ce système de commutateur pour un de mes télégraphes imprimeurs.

Le commutateur, représenté fig. 15 est, comme le précédent, un commutateur à renversement de pôles combiné à un commutateur complexe. Il a pour but de faire réagir le courant d'une manière différente sur un certain nombre de circuits, afin de produire deux effets au lieu d'un.

Supposons, pour fixer les idées, qu'un certain nombre d'électro-aimants, quatre par exemple, puisse, en réagissant tour à tour sur une aiguille aimantée, lui faire accomplir une demi-révolution sur elle-même: il faut que le commutateur en question, tout en étant soumis au même mouvement, renverse le courant après que cette première série de réactions a été opérée, afin que l'aiguille aimantée achève d'accomplir sa révolution sur elle-même sans nécessiter l'intervention d'un plus grand nombre d'électro-aimants.

Pour résoudre ce problème, il suffira de fixer l'une dans l'autre sur une planche de bois trois circonférences concentriques OA, OB, OC, et de faire réagir sur elles un double levier DE armé de quatre ressorts frotteurs F, G, H, I (à

piston). La première circonférence OC sera divisée en huit secteurs, et ces secteurs seront reliés diamétralement deux à deux de manière à ne former que quatre circuits $d'e$, ic' , $g'b'$, $a'h$. La circonférence du milieu OB sera entièrement pleine, et communiquera avec un fil LM, commun à tous les circuits. Enfin la circonférence la plus petite OA sera divisée en deux parties égales MGK, MAG auxquelles aboutiront les deux pôles de la pile.

D'un autre côté, les frotteurs F, G, H, I seront reliés deux à deux, c'est-à-dire que F sera en communication avec G, et que H sera relié avec I. Cela posé, voyons comment le courant va se trouver renversé pour chaque demi-révolution du levier DE. Dans la position de ce levier sur la figure, le courant entre par la demi-circonférence MGK, remonte le frotteur G, regagne le frotteur F par le fil GF, et parcourt le circuit $d'e$ pour revenir en L par le fil commun Lm. Il suit une partie de la circonférence OB, remonte par le frotteur I, et regagne la pile par le fil HI, le frotteur H et la demi-circonférence MAG. Le courant va donc de m en L dans le fil commun.

La même marche sera suivie par le courant, quoiqu'en changeant de circuit à mesure que le levier DE s'avancera en c , en b et en a ; mais lorsque ce levier sera arrivé en d' , c'est-à-dire après une demi-révolution accomplie, les conditions de transmission du courant seront changées. En effet le frotteur F appuiera alors en d , le frotteur G sera en H, le frotteur H en G, et le frotteur I en I'. Le courant entrera donc dans les circuits par le frotteur H et le fil LM, et en ressortira par les frotteurs F et G pour regagner la demi-circonférence MAG et la pile; il se trouve donc dirigé à travers le fil commun Lm de L en m , c'est-à-dire précisément en sens inverse de sa direction première¹.

1. J'ai employé ce système de commutateur pour mes anémomètres électriques.

Si deux circuits ASB, CRD (fig. 16) sont entraînés dans un mouvement de rotation autour d'un axe vertical O, ce qui est le cas de deux bobines isolées appartenant à un électro-aimant dont le fer est traversé par un axe parallèlement à ses branches, le commutateur à renversement de pôles peut être considérablement simplifié; il peut consister, en effet, dans une bague de cuivre coupée par la moitié et sur laquelle appuient deux ressorts EF, GH en rapport avec les pôles de la pile. En effet, dans la position des circuits sur la figure, le courant entre par la moitié BED de la bague dans chaque circuit, et en ressort par la moitié AGC. Or, après une demi-révolution, le contraire a lieu.

Il est facile de comprendre que si, dans l'une des branches du courant qui unit le commutateur à la pile, on interpose un électro-aimant fixe, on peut obtenir entre cet électro-aimant et l'électro-aimant mobile dont nous parlions à l'instant, une réaction magnétique, par attraction et par répulsion, qui peut faire de ce système un électro-moteur ¹.

La fig. 21 (Pl. III) étant combinée avec le système de ressorts qui est indiqué en pointillé, constitue un commutateur à renversement de pôles, qui peut aussi être employé dans les électro-moteurs. Admettons, en effet, que les deux pôles de la pile correspondent aux ressorts K et H, et que les ressorts R, S, BI, GE aboutissent aux boutons d'attache Q et T; à chaque demi-révolution de l'axe XY, le courant sera renversé, car ce courant, entrant par le ressort K dans le commutateur, pénètre dans le circuit par l'excentrique AB, le ressort BI et le fil IT; il en ressort par le fil QS, le ressort S, l'excentrique CD et le ressort H. Après une demi-révolution, le courant entre dans le circuit par le ressort R et le bouton Q et en ressort par le bouton T et ressort GH.

1. Employé par M. Mirand dans son électro-moteur.

Le commutateur de la fig. 17 (Pl. IV) est encore un commutateur à renversement de pôles combiné à un interrupteur complexe. Il peut être employé comme transmetteur pour les télégraphes à armatures aimantées. L'effet produit est une série de renversements successifs de courant, qui peuvent produire, de la part d'une armature aimantée, un nombre déterminé de vibrations.

Ce commutateur se compose principalement de deux circonférences doublement dentées incrustées sur les deux joues d'une roue d'ivoire. Deux ressorts AB, CD, disposés de manière à appuyer sur les dents externes et internes de chacune de ces deux circonférences, sont en rapport avec les deux pôles de la pile, et ont pour fonction de mettre alternativement chacune de ces deux circonférences tantôt en rapport avec le pôle positif, tantôt en rapport avec le pôle négatif. Ce sont alors deux autres ressorts ET E'F qui appuient sur la partie pleine des circonférences qui prennent leur polarité différente et la transmettent aux boutons d'attache du circuit.

Le jeu de ce commutateur s'explique aisément : quand c'est le ressort AB qui touche la circonférence OAC, cette circonférence devient négative ; mais le ressort C' D' qui touche alors l'autre circonférence rend celle-ci positive, de sorte que, dans ce cas, le courant va du ressort E' F' au ressort EF. Quand, au contraire, le ressort CD touche cette même circonférence OAC, le pôle positif se trouve transmis au ressort EF, et le pôle négatif est reporté sur le ressort E' F' ; alors le courant va de EF en E' F'. Remarquons que chaque inversion, dans le sens du courant, correspondant à chaque passage d'une dent au commutateur, et ces dents correspondant elles-mêmes aux crans de la roue à rochet, il suffit de faire sauter tel ou tel nombre de crans de cette roue pour obtenir un pareil nombre d'inversions successives de courant, et, par suite, pour ob-

tenir tel ou tel nombre de vibrations d'un électro-aimant à armature aimantée.

Après avoir ainsi passé en revue les différents moyens de renverser alternativement ou à volonté le sens d'un courant fourni par une pile, nous allons étudier la contrepartie de cette question, c'est-à-dire la manière de redresser dans un même sens des courants alternativement inverses. On sait que les courants d'induction sont précisément dans ce cas.

Les fig. 19 et 19 *bis* montrent l'une des dispositions les plus simples de ce genre de commutateurs. Dans la figure 19, l'appareil est représenté vu en coupe; dans la figure 19 *bis*, il est vu en projection. Ce commutateur, comme on le voit, se compose d'un cylindre d'ivoire ou de bois sur lequel sont incrustées huit bandes métalliques A, B, C, D, E, F, G, H, disposées parallèlement suivant la génératrice du cylindre. Quatre de ces bandes B, H, F, D sont coupées par la moitié et isolées l'une de l'autre, mais toutes ces moitiés communiquent diagonalement entre elles par quatre fils HD, BF et traversant le cylindre d'ivoire. Enfin quatre frotteurs I, J, K, L appuient sur le cylindre aux extrémités d'un même diamètre. Deux de ces frotteurs sont en rapport avec la source électrique qui fournit les courants alternativement renversés, et les deux autres constituent les pôles du circuit à travers lequel doit passer le courant redressé.

Pour comprendre la manière dont fonctionne ce commutateur, il suffit d'observer que toutes les fois que les lames doubles passent sous les frotteurs, ce qui arrive en même temps pour chaque paire de ressorts, le courant se trouve transmis diagonalement aux pôles du circuit, tandis que, quand ce sont les lames pleines qui viennent en contact des ressorts, le courant se trouve transmis directement et latéralement d'un ressort à l'autre.

Supposons donc que, dans la position de la figure, le ressort I soit en rapport avec le courant induit de manière à constituer un pôle positif, tandis que L sera pôle négatif. Au moment où les plaques H et D viendront à passer sous les ressorts, I communiquera avec K, L avec J, de sorte que le courant traversera le circuit de K en J.

Au moment où les plaques A et E passeront sous les ressorts, c'est-à-dire après un quart de la révolution du cylindre, le courant induit aura été renversé, de sorte que I sera pôle négatif et L pôle positif, mais alors la communication électrique, au lieu de se faire de I en K et de L en J par les fils traversant l'ivoire, se fera directement par les plaques A et E, de sorte que K deviendra comme précédemment pôle positif, et J pôle négatif.

Ainsi, à chaque quart de révolution du cylindre, les courants, alternativement renversés qui traversent le commutateur, se trouvent immédiatement redressés.

Ce commutateur, comme on peut facilement s'en rendre compte, n'est autre que le commutateur de la fig. 14 adapté à un mouvement de rotation.

Le commutateur des machines de Clarke, représenté fig. 18 et 18 *bis*, est encore plus simple ; il pourrait consister uniquement dans deux demi-bagues métalliques isolées l'une de l'autre, sur un cylindre d'ivoire, et sur lesquelles appuieraient, aux deux extrémités d'un même diamètre du cylindre, deux ressorts de cuivre. Ces bagues seraient elles-mêmes reliées, l'une à l'axe de rotation du commutateur qui serait lui-même en rapport avec l'un des pôles de la source électrique, l'autre au second pôle de cette même source électrique. Mais comme la machine de Clarke est le plus souvent utilisée comme machine à commotions, et qu'il est nécessaire d'interrompre le courant induit lui-même, on a dû ajouter au commutateur un interrupteur spécial, et c'est pour cela que les fig. 18 et 18 *bis* se trouvent compli-

quées de deux ressorts et d'une bague contournée ABCD, AB'C'D'. Du reste, les deux figures représentent le même commutateur sous deux aspects diamétralement opposés, et dans lesquels la bande ABCD de la première figure se continue par le point A (commun aux deux figures) avec la bande AB'C'D'. De même le demi-anneau EF, dont on ne voit que la moitié dans la première figure, se continue en FE' dans la seconde. Il n'y a que l'anneau IJ qui se présente sous le même aspect dans les deux positions du commutateur parce qu'il est continu. Cet anneau est d'ailleurs lui-même en communication directe avec celui des pôles de la source électrique qui touche la demi-bague EFE'. Quant à l'anneau contourné DCBAB'C'D' il est relié à l'axe métallique du commutateur auquel communique déjà le second pôle de la source électrique.

Pour que l'on puisse bien comprendre la double réaction opérée par ce commutateur, nous allons d'abord étudier celui-ci dans toute sa simplicité, et nous admettrons qu'après chaque demi-révolution du commutateur les courants qui proviennent de la source électrique sont alternativement renversés. Supposons donc que, dans la position de la fig. 18, P soit positif et O négatif, le courant ira de P en EF et entrera dans le circuit par le bouton d'attache S; il reviendra par le bouton R à la bande ABCD, et retournera à la source par l'axe du commutateur et le bouton O. Après une demi-révolution, O étant devenu positif et P négatif, le courant entre dans le circuit par l'axe du commutateur, la bande AB'C'D', le ressort GS et revient à la source par le ressort RB, la bande EE', l'anneau IJ et le bouton I; le courant, dans les deux cas, va donc bien dans le même sens puisqu'il va de S en R. Nous allons voir maintenant le rôle des deux autres ressorts KL, MN, qu'il faut avoir soin de retirer quand on veut employer les machines de Clarke comme source d'électricité.

Quand le ressort **K L** appuie sur la bande **DCBAB'C'D'**, il forme un circuit spécial à travers le commutateur. En effet, le ressort **MN** étant en contact continu avec l'anneau **IJ**, et celui-ci communiquant avec la bande **EFE'** il joue, par sa liaison métallique **MK**, avec le ressort **K L** le même rôle que si on réunissait les deux moitiés d'anneau **EFE'** et **BAB'** auxquelles aboutissent toujours les pôles des courants fournis par la source. En interrompant ce circuit spécial au moment où les courants induits ont acquis tout leur développement, on reproduit à travers le second circuit, complété par le corps humain, les mêmes effets que quand on interrompt avec les deux mains un circuit voltaïque d'une très-grande tension. Or, nous verrons, quand nous en serons aux applications électro-médicales, que ces interruptions seules suffisent pour donner de très-fortes commotions.

Quant à la manière dont prennent naissance les courants dont nous venons d'analyser le parcours, nous verrons plus tard, au chapitre des machines magnéto-électriques, comment se manifeste le phénomène.

On peut faire encore des commutateurs éliminateurs pour n'utiliser qu'un seul des courants produits par les machines d'induction. Dans ce cas, le commutateur précédent pourrait se réduire à une simple lame **EF** moitié de la demi-bague **EFE'**. Mais les deux ressorts **SG**, **RB** devraient être reliés ensemble, et les pôles du circuit correspondraient l'un à un bouton d'attache en rapport avec l'axe de rotation du commutateur, l'autre à l'un des boutons **S** ou **R**. Le noyau d'ivoire lui-même devrait être susceptible d'être tourné à volonté, afin de placer la petite plaque **EF** (par rapport à l'instrument), de manière à recueillir soit le courant inverse, soit le courant direct.

Je n'insisterai pas davantage sur cette question des commutateurs qui, comme on le comprend aisément, peuvent être variés à l'infini, car je n'ai pas l'intention de faire ici

une nomenclature de tous les commutateurs jusqu'à présent inventés; je voulais seulement indiquer la manière dont on peut les combiner, suivant les différents cas qui peuvent se présenter. D'ailleurs j'aurai plus tard occasion de revenir sur cette question dans la description que je ferai des différentes applications mécaniques de l'électricité.

V.

RELAIS ET RHÉOTOMES.

Quand un courant électrique doit traverser un long circuit, il peut se trouver affaibli à tel point qu'il n'ait plus la force de faire marcher les appareils sur lesquels il doit agir. Sans doute en renforçant la pile on pourrait augmenter son énergie, mais ce moyen, outre les frais considérables qu'il entraînerait, aurait beaucoup d'inconvénients pour le réglage des appareils; on a donc dû chercher à établir des systèmes électro-mécaniques susceptibles de réagir sur un courant intermédiaire, de manière que celui-ci pût succéder au courant primitif tout en étant soumis aux mêmes influences excitatrices. Ce sont les instruments capables de réaliser ce résultat auxquels on a donné le nom de *relais*, nom d'ailleurs parfaitement choisi, puisque, semblables à un relais de poste, ces instruments relayent le courant pour permettre à l'action physique qu'ils provoquent d'être exercée plus loin.

C'est M. Wheatstone qui, en 1837, eut le premier l'idée des relais, et cette idée lui vint lorsque, après ses premières expériences de télégraphie électrique, il reconnut que ses électro-aimants devenaient impuissants pour une certaine longueur de circuit, alors que les phénomènes de décomposition chimique et de déviation de l'aiguille ai-

mantée se manifestaient encore d'une manière parfaitement appréciable. Il reconnut plus tard que cette impuissance de ses électro-aimants venait de ce qu'ils étaient enroulés de gros fil et ne présentaient pas une résistance en rapport avec le circuit; mais à cette époque (en 1837) les lois de Ohm étaient à peine connues et n'avaient pas encore été discutées au point de vue des électro-aimants. Il chercha donc à faire fonctionner les électro-aimants de ses appareils au moyen d'un courant *local* mis en action sous l'influence d'une décomposition chimique ou d'une déviation de l'aiguille aimantée. Il construisit à cet effet deux appareils qui réalisèrent l'effet cherché.

L'un de ces appareils consistait dans une espèce de thermomètre ABC, fig. 1, pl. V, dont la boule CB était à moitié remplie d'eau acidulée et dont le tube AB contenait du mercure jusqu'à un certain niveau D. Un petit tube recourbé GCK, dans lequel étaient versées quelques gouttes de mercure, communiquait à la partie supérieure de la boule BC, et deux fils de platine I, J placés à un millimètre de distance l'un de l'autre, à l'intérieur de cette boule, étaient en rapport avec le circuit de la ligne. De leur côté, le mercure du tube et un fil de platine AD, plongeant dans ce tube, étaient en rapport avec le circuit de la pile locale, à travers lequel était interposé l'électro-aimant. Quand la fermeture du circuit de la ligne était opérée, la décomposition de l'eau s'effectuait dans la boule C et les gaz qui en provenaient distendaient la petite colonne d'air CK, jusqu'à leur évacuation, à travers le bouchon de mercure G, provoquaient l'ascension du mercure dans le tube AB, et par suite le contact de ce liquide avec le fil de platine AD; après l'évacuation des gaz, ce contact cessait. Ainsi, toutes les fois qu'une fermeture de courant était opérée sur l'un des circuits, elle était répétée immédiatement sur l'autre,

et les fonctions du relais se trouvaient par cela même accomplies.

Toutefois ce système ne put être appliqué, car la transmission des signaux devenait par ce moyen beaucoup trop longue et trop peu certaine. M. Wheatstone fut donc obligé de recourir aux réactions magnétiques de l'aiguille aimantée; mais cette fois il put résoudre le problème.

Qu'on imagine disposé verticalement sur une planche un fort galvanomètre AB (fig. 2), dont l'aiguille aimantée GH, fixée sur un axe à pivot, porte perpendiculairement à cet axe une traverse très-fine CD. On comprendra qu'un courant, traversant le galvanomètre AB et inclinant l'aiguille GH dans un sens ou dans l'autre, fera exécuter le même mouvement à la traverse CD. Or, si cette traverse se termine elle-même par une petite fourchette en platine ICJ, placée à portée de deux godets remplis de mercure I et J, lesquels godets seront supportés par des colonnes métalliques IK, JL en rapport avec le circuit de la pile locale P, il arrivera qu'à chaque fermeture de courant opérée à travers le galvanomètre, la fourchette ICJ réunira les deux godets pleins de mercure, et fermera le courant à travers le circuit de la pile locale P. Il suffira donc d'interposer le galvanomètre AB dans le circuit de la ligne pour obtenir l'effet voulu. Tel est le premier relais qui a été mis en usage dans la télégraphie électrique, et ce relais, comme je l'ai déjà dit, a été imaginé par M. Wheatstone.

Quand les lois des électro-aimants furent étudiées, et qu'on sut que la résistance du fil enroulé sur ces organes électriques devait être à peu près égale à celle du circuit de la ligne, plus la résistance intérieure de la pile; en un mot, quand on employa le fil fin pour les électro-aimants, on put renoncer au relais galvanométriques et utiliser

dans le même but les électro-aimants eux-mêmes, ce qui fut facile.

Concevons, en effet, à la station intermédiaire où doit être installé le relais, un électro-aimant AB (fig. 3), dont l'armature CD soit en rapport avec l'une des branches du circuit de la pile locale ou supplémentaire; tandis que son fil sera interposé dans le circuit de la ligne, on comprendra que pour fermer le second circuit sous l'influence du premier, il ne s'agira que de placer au-devant ou en regard d'une lame métallique CI, fixée sur cette armature, un ressort EF en connexion avec la seconde branche du circuit de la pile supplémentaire; car chaque fermeture du premier circuit ayant pour effet l'abaissement de l'armature CD, cet abaissement établit le contact métallique entre les deux branches du second circuit qui se trouve dès lors fermé. On correspond donc de cette manière comme si les deux courants n'en faisaient qu'un.

L'électro-aimant représenté dans la fig. 3 est une des combinaisons les plus simples des relais, mais il est facile de comprendre que toutes les dispositions des électro-aimants que nous avons figurées dans la planche II, et qui ont pour effet d'attirer une armature placée à distance, peuvent être combinées de manière à constituer un relais. Bien plus même, des électro-aimants à armatures aimantées, disposés comme dans la fig. 42 (pl. II), peuvent réagir alternativement sur deux circuits intermédiaires différents, sous l'influence d'un seul circuit primitif, à travers lequel on fait circuler le courant dans deux sens différents. Ce système de relais est très-précieux dans les usages de la télégraphie électrique, comme nous le verrons dans le prochain volume.

Pour qu'on puisse se rendre compte du jeu de ces relais à double effet, supposons qu'on ait à agir sur deux mécanismes différents commandés par des électro-aimants ordi-

naires, et qu'on n'ait à sa disposition pour faire réagir le relais qu'un seul circuit passant par les électro-aimants AB CD, EF (fig. 4, pl. V), on adaptera aux armatures GH, IJ deux lames de ressort GO et LP, et en regard de ces deux lames deux autres ressorts KL, MN. On mettra les pivots d'articulation X et Y des armatures en rapport avec l'un des pôles de la pile supplémentaire, et les ressorts KL, MN communiqueront chacun avec un des deux circuits. Suivant que le courant sera dirigé dans un sens ou dans l'autre, à travers les électro-aimants, ce sera l'une ou l'autre des deux armatures qui sera mise en mouvement et qui, par son contact avec les ressorts MN, LK, mettra en jeu l'un ou l'autre des deux mécanismes interposés dans les circuits du relais.

Avec la disposition de la fig. 40 (pl. II), on pourrait résoudre le problème avec une seule armature, mais comme il n'y aurait aucun point fixe contre lequel l'armature viendrait butter, ce moyen ne pourrait s'appliquer à une correspondance télégraphique.

Les contacts électriques opérés par le relais, au lieu de se faire par l'armature elle-même, pourraient, comme on le comprend aisément, s'obtenir par le rapprochement de deux lames de ressort que viendraient réunir l'armature attirée. Disposés de cette manière les relais pourraient être complexes et réagir à la fois sur tel nombre de circuits particuliers qu'on le désirerait, pourvu toutefois que l'attraction de l'électro-aimant fût assez forte pour vaincre la résistance opposée par tous ces ressorts. Du reste, en plaçant les lames *très-près l'une de l'autre*, et de manière à n'être touchées par l'armature qu'au moment de son contact avec les pôles de l'électro-aimant, on peut obtenir toujours assez de force pour le fonctionnement de ces relais, quelque complexes qu'ils soient.

Les relais que nous venons de décrire sont ce que nous

appellerons *des relais conjoncteurs*, puisque chaque action initiale accomplie par eux a pour effet une fermeture de courant. Mais, de même qu'il y a des interrupteurs conjoncteurs et *disjoncteurs*, de même il peut y avoir des relais *disjoncteurs*. C'est-à-dire des relais appelés à fournir une interruption de courant pour chaque attraction de leur armateur. Ces relais disjoncteurs sont tout aussi simples que les autres; il n'y a, pour les transformer l'un dans l'autre, qu'un déplacement de ressorts à effectuer. Ainsi, le ressort EF, fig. 3, pl. V, au lieu d'être placé sur le trajet de l'armature CD, est établi du côté opposé en E'F', de manière que cette armature, en son point de repos, établisse un contact intime entre le ressort IC et la lame E'F'. Tant que le relais est inerte, le courant reste fermé dans le circuit supplémentaire; mais aussitôt qu'il devient actif, ce courant est interrompu. Il va sans dire que les relais disjoncteurs peuvent être aussi variés dans leurs formes et leur disposition que les relais conjoncteurs; qu'ils peuvent être combinés aux électro-aimants à armature aimantée, et fournir par conséquent deux interruptions alternatives du courant supplémentaire pour une fermeture de courant opérée, dans un sens ou dans l'autre, dans le circuit du relais. Enfin les relais peuvent être à la fois relais conjoncteurs et relais disjoncteurs.

Un des problèmes qui a le plus préoccupé les constructeurs dans le jeu des armatures des électro-aimants employés comme relais a été d'augmenter le plus possible la rapidité d'action de la force antagoniste, afin d'obtenir le plus de vibrations possible de la part de ces armatures. Comme les relais n'ont pas à opérer une action mécanique ni même un déclenchement, on a pu rapprocher considérablement les armatures de leurs électro-aimants, de sorte que l'étendue des mouvements à accomplir a pu être réduite de près de moitié, mais cette précaution n'é-

tait pas encore suffisante, et on a cherché à combiner les ressorts antagonistes de manière à fournir une réaction presque aussi prompte que l'action électro-magnétique¹. M. Hipp y est à peu près parvenu dans son système de ressorts antagonistes à double effet. Ce système consiste dans deux ressorts boudin fixés sur l'armature du relais, de manière à réagir en sens contraire l'un de l'autre. L'un de ces ressorts est plus tendu que l'autre, de sorte que c'est la différence de tension des deux ressorts qui est utilisée comme force antagoniste. M. Hipp prétend que cette disposition réalise l'effet voulu.

Je n'insisterai pas ici sur la disposition qui a été donnée aux différents relais actuellement en usage dans la télégraphie, car j'aurai occasion de les décrire plus tard avec les appareils télégraphiques auxquels ils appartiennent. Le but que je me suis proposé dans ce chapitre était simplement d'en exposer le principe et de démontrer les différents usages auxquels on peut les employer.

Jusqu'à présent nous avons vu les relais agir d'une manière plus ou moins complexe sur des circuits particuliers soumis à l'influence d'une pile locale, mais il peut arriver qu'on veuille utiliser les relais comme moyen d'action électro-magnétique dans le cas où deux courants électriques étant fermés, l'un d'eux viendrait à être interrompu. Dans ce cas, l'électro-aimant du relais doit être enroulé avec deux fils différents. L'un de ces fils est mis en rapport avec l'un des deux circuits, tandis que le second fil est en communication avec l'autre circuit, mais les bouts de jonction

1. Avec les ressorts ordinaires il y a une différence considérable entre les deux actions; on peut s'en assurer dans un mécanisme à double déclenchement; quand c'est le ressort antagoniste qui agit, le déclenchement s'opère d'une manière certaine. Quand c'est la force électro-magnétique, le déclenchement n'a pas le temps de s'effectuer et l'appareil ne fonctionne pas.

de ces fils doivent être choisis de telle manière que les deux courants traversent l'électro-aimant en sens contraire l'un de l'autre. Si les deux courants sont d'égale intensité, l'action électro-magnétique produite par eux sur l'électro-aimant sera nulle, puisque l'effet produit par l'un sera détruit par l'autre. Mais si l'un de ces courants vient à être interrompu, le second courant agit seul, et dès lors l'électro-aimant peut devenir actif et faire réagir le relais.

Si les deux courants ne sont pas égaux, il est facile de les équilibrer en introduisant dans le circuit, à travers lequel circule le courant le plus fort, un fil de résistance, jusqu'à ce que l'électro-aimant devienne inerte.

Ce système de relais mis en usage, pour la première fois en 1840, par M. Wheatstone pour son chronoscope électrique, a fourni dernièrement le moyen de transmettre simultanément deux dépêches différentes, à travers le même fil, comme nous le verrons plus tard.

RHÉOTOMES.

Il arrive souvent dans les applications mécaniques de l'électricité qu'on ait à maintenir ou à faire disparaître une action électrique après que la cause qui l'a motivée a cessé d'exister ou subsiste encore. Dans ce cas on est obligé d'avoir recours à des intermédiaires mécaniques appelés rhéotomes.

Ces mécanismes varient suivant les cas de leur application, suivant le mouvement des pièces sur lesquelles ils doivent agir, enfin suivant le mouvement qu'on peut leur appliquer.

Premier système. Le cas le plus simple où l'on puisse appliquer les rhéotomes est celui dans lequel on est obligé de maintenir l'action d'un électro-aimant, après que la cause initiale qui a fermé le courant a cessé d'agir. On peut se trouver alors dans deux conditions différentes : ou l'on

peut sans inconvénient se servir du courant qui a été rompu, ou ce courant devant être utilisé d'une autre manière, on est dans l'impossibilité de l'appliquer au rhéotome.

Dans le premier cas, quand il ne s'agit que d'un électro-aimant à armature de fer doux, mis en action par un simple interrupteur, une lame d'argent ou de platine isolée placée devant l'armature, du côté de la bobine de l'électro-aimant, constitue à elle seule le rhéotome. En effet, le courant qui part de la pile et qui passe par le fil de l'électro-aimant pour se mettre en rapport avec l'interrupteur, peut se bifurquer et être dirigé sur la lame isolée d'argent ou de platine; l'autre branche du courant, qui aboutit directement à l'interrupteur, peut également se bifurquer pour mettre le support de l'armature en rapport avec la pile. Il arrive donc que, quand l'armature, d'abord attirée sous l'influence de l'interrupteur, rencontre la lame métallique placée sur son chemin, elle ferme à son tour le courant à travers l'électro-aimant, avant que l'action de l'interrupteur soit terminée; et comme aucune cause mécanique ne peut faire cesser cette action, cette armature reste collée jusqu'à ce qu'une interruption, faite sur l'une des bifurcations, ait détruit l'effet électro-magnétique.

Quand l'électro-aimant agit sous l'influence d'un commutateur à renversement de pôles, ce qui lui suppose une ou deux armatures aimantées et une action double, c'est-à-dire la fonction d'attirer alternativement ces armatures, la simple lame ne peut plus suffire, car la communication de l'électro-aimant avec la pile ne peut se faire que par l'intermédiaire du commutateur. Il faut donc que les liaisons de l'électro-aimant, à travers le rhéotome, soient complètement coupées quand celui-ci ne fonctionne pas. Quatre lames métalliques A, B, C, D, fig. 5, deviennent alors nécessaires pour constituer le rhéotome, et l'armature doit

T₂₄.5

être munie d'une traverse d'ivoire pour ne pas établir de communication entre ces lames quand elle vient à les rencontrer. Ces lames du reste se trouvent reliées au circuit, comme on le voit dans la figure, c'est-à-dire que les deux lames inférieures communiquent aux deux pôles de la pile, et les deux supérieures aux deux bouts de fil de l'électro-aimant. Dans l'exemple que nous avons choisi, c'est la fermeture de courant opérée par la bascule du commutateur, dans sa position sur les deux lames H, G, qui doit être maintenue par le rhéotome pour éviter l'influence de l'interruption du courant, lorsque la bascule passe des lames H, G sur les lames E, I, influence qui aurait pour effet de repousser trop tôt l'armature OP.

En conséquence, la lame D est unie au même pôle de la pile que la lame H, et la lame B communique au fil en rapport avec cette même lame H. D'un autre côté la lame C aboutit au même pôle que la lame G, tandis que la lame A communique avec la liaison Q G.

Le jeu de ce rhéotome est facile à comprendre : quand le courant passe à travers la bascule du commutateur l'armature OP est attirée, elle repousse les quatre lames les unes contre les autres, et au moment où cette bascule traverse la solution de continuité entre les plaques du commutateur, le courant passe par le rhéotome de la même manière, et continue d'attirer l'armature jusqu'à ce que le commutateur, renvoyant un courant inverse au moment de la chute de la bascule sur les plaques EI, ait neutralisé cette action ¹.

Quand l'armature de l'électro-aimant est aimantée et oscille entre les pôles d'un électro-aimant, comme dans la fig. 6, la disposition du rhéotome est un peu différente quoique les éléments soient les mêmes. Au lieu de quatre

T. 5

1. Ce rhéotome a été employé par moi pour mon calendrier électromagnétique.

plaques il y en a huit, et les lames d'argent qui doivent être poussées par un même mouvement de l'armature, se trouvent disposées des deux côtés de celle-ci; d'ailleurs mêmes communications électriques ¹.

Dans le cas où l'on veut maintenir l'action produite par l'électro-aimant, et employer pendant ce temps le courant qui a déterminé cette action, l'adjonction d'un second électro-aimant est indispensable, et le rhéotome se trouve constitué par lui.

Pour cela il faut que l'armature de l'électro-aimant M (fig. 7) qui doit recevoir l'effet du rhéotome, soit terminée à son extrémité libre par une dent A, et que l'armature de l'électro-aimant rhéotome porte un crochet d'encliquetage, ou une boucle BC, placé perpendiculairement devant l'extrémité libre de l'autre armature. Le jeu de ce rhéotome s'explique de la manière suivante: sous l'influence du courant initial, l'armature AE est attirée; mais en se rapprochant de l'électro-aimant M elle soulève par sa dent A le crochet BC, et cette dent se trouve bientôt engagée dans l'entaille pratiquée sous ce crochet. Dès lors cette armature ne peut plus se relever sous l'effort de son ressort antagoniste, et ce n'est que quand on a rétabli le courant à travers l'électro-aimant M' qu'elle redevient libre ².

Il est encore une autre manière de résoudre ce problème quand on peut disposer de deux courants: c'est d'employer les quatre ressorts de la fig. 5, d'en mettre deux en rapport avec l'électro-aimant qui exige le rhéotome, et les deux autres en communication avec les deux pôles du second courant. Alors on peut réagir à travers cet électro-aimant avec le premier courant, comme s'il n'existait pas,

1. Ce rhéotome a été employé par moi pour l'appareil à signaux de mon moniteur des chemins de fer.

2. Ce rhéotome a été employé par M. Tyrer pour ses appareils de sécurité pour les chemins de fer.

ou détruire l'action du rhéotome, suivant la manière dont on dirige le courant dont on a voulu se ménager l'usage ¹.

Deuxième système. Les rhéotomes assujettis à des effets mécaniques déterminés, et par conséquent adaptés à des mécanismes dont les mouvements peuvent être de diverse nature, doivent nécessairement être différents, suivant la nature de ces mouvements. Avec les mouvements circulaires ils sont généralement assez simples.

Supposons, par exemple, qu'une aiguille entraînée d'une manière quelconque autour d'un cadran doive retomber de toute la hauteur à laquelle elle s'est élevée, sous l'influence d'une fermeture de courant qui peut être opérée instantanément, il pourrait arriver que cette aiguille, dont le mouvement serait commandé par l'armature d'un électro-aimant, n'eût accompli sa révolution entière quand le courant aurait été interrompu. De là une perturbation générale dans les indications de l'appareil. Un rhéotome devient donc nécessaire, et ce rhéotome doit être commandé par la révolution qui doit être accomplie. Nous avons déjà vu comment, par une lame de ressort placée sur le trajet de l'armature, on pouvait maintenir l'action attractive d'un électro-aimant. Un système semblable pourra être appliqué dans le cas qui nous occupe, afin de maintenir le débrayage du mouvement de l'aiguille. Une communication directe sera donc établie entre la pile et l'armature A, fig. 8, et le ressort B sera mis en rapport avec le fil de l'électro-aimant M allant à l'interrupteur I. Au moment de la fermeture du courant en I l'armature A sera attirée, et rencontrant la lame B elle continuera l'action de l'interrupteur I, qui pourra dès lors ne plus exister.

Le tambour C, qui doit toujours ramener l'aiguille au

1. Ce système de rhéotome a été employé par moi dans mon maréographe électrique.

repère J par l'effet du contre-poids P, portera un anneau de cuivre DE interrompu seulement en un point E correspondant à la position de l'aiguille au repère, et sur cet anneau, d'ailleurs en rapport avec l'électro-aimant M, appuiera une lame de ressort EK communiquant avec la pile. Voici alors ce qui a lieu :

Quand la fermeture opérée en I a rendu l'aiguille libre d'être entraînée par le contre-poids P, le courant est maintenu par le rhéotome. Mais comme la continuité métallique entre la pile et l'électro-aimant n'existe que par l'effet du contact de l'anneau DE avec le ressort EK, aussitôt que ce dernier se trouve sur la solution de continuité cette continuité n'existe plus, et l'électro-aimant, malgré le rhéotome, devient inerte et pousse de nouveau l'aiguille GH contre le mécanisme qui le sollicite ¹.

Autre exemple : Vous voulez décrocher le levier AB, fig. 9, de dessus le ressort à crochet DE; mais comme le levier AB est d'un certain poids, et que la force électromagnétique commandant ce crochet pourrait ne pas être suffisante, vous voulez que l'action électrique ne se manifeste que quand une cheville F appartenant à la roue G d'un mouvement d'horlogerie l'aura soulevée et aura conséquemment dégagé entièrement le crochet. Pour cela, vous terminerez le levier AB par une tige AH articulée comme le battant d'un fléau; vous mettrez en rapport la roue G avec la pile, et le levier AB avec l'électro-aimant. Il arrivera alors que la fermeture du courant opérée en O ne s'effectuera que quand le levier AB sera soulevé, et le prolongement de cette fermeture, jusqu'à ce que le levier AB soit descendu au-dessous du crochet qui sera alors repoussé par l'électro-aimant, sera obtenu par le frotte-

¹ Ce rhéotome a été imaginé par moi pour le barométrographe de M. Liats.

ment de la tige A H, laquelle suivra la cheville F jusqu'à ce que le levier A B ait échappé ¹.

Troisième exemple. Une étoile composée de quinze rayons flexibles portant chacun un caractère en relief, accomplit son mouvement de rotation sur elle-même en trente secondes, par l'effet d'un mécanisme d'horlogerie. Chaque rayon met donc deux secondes pour prendre la place de celui qui l'a précédé; il en résulte qu'un marteau imprimeur étant sollicité par un effet électrique qui peut être variable, pourrait bien ne pas rencontrer le rayon qu'il doit frapper, parce que celui-ci ne sera pas arrivé à temps au repère. Force sera donc de suspendre l'action électrique qui met en jeu ce marteau jusqu'en temps propice. Il suffit pour cela que l'étoile porte un disque d'ivoire sur lequel des plaques métalliques, correspondant aux rayons de l'étoile, seront incrustées; un frotteur A B, fig. 10, placé exactement devant le repère, appuiera sur ce disque et sera mis en rapport avec l'électro-aimant commandant le jeu du marteau imprimeur, tandis que l'axe de l'étoile communiquera avec la pile. Il est facile, d'après cela, de prévoir ce qui doit arriver dans le cas où la fermeture du courant s'opérerait avant l'arrivée d'un des rayons au repère; car alors le frotteur A B se trouve appuyer sur une partie isolante. Ce n'est donc qu'au moment où le rayon désigné arrivera au repère que le courant sera fermé ².

Dans ces deux derniers exemples, nous avons supposé la fermeture du courant à l'interrupteur susceptible d'être prolongée un certain temps; mais si elle ne pouvait pas l'être, nous savons, d'après les moyens que nous fournissent les rhéotomes du premier système, comment on peut la prolonger.

1. Ce système de rhéotome a été employé par moi dans mon enregistreur des improvisations musicales.

2. Ce système de rhéotome a été employé par M. Wheatstone dans son enregistreur météorologique.

Quatrième exemple. Une masse de fer *M* (fig. 11) oscille au-dessus d'un électro-aimant droit *A*. Vous voulez que l'action attractive de cet électro-aimant dure tout le temps des oscillations descendantes, et soit détruite pendant toute la durée des oscillations ascendantes ¹ :

Pour cela vous faites l'électro-aimant *A* mobile dans un étui, et vous lui faites supporter, par l'intermédiaire d'une tige *A K*, un levier bascule *CD*. Ce levier, quand l'électro-aimant est inerte, appuie sur un buttoir *DH* mis en rapport avec le pôle négatif de la pile, et un second buttoir *GI* sur lequel appuie, au moment de la fermeture du courant dans l'électro-aimant *A*, le levier *EF* appartenant à un second système d'interrupteur. Ce levier *EF* porte une armature de fer doux *O*, et se termine par un cliquet d'impulsion *F*, qui réagit au moment de l'abaissement du levier sur un système d'engrenages *LM* commandé par une roue à rochet, et réglé dans son mouvement par un volant à ailettes *M*. Enfin un second électro-aimant *T*, placé sous l'armature *O*, est relié, d'une part, avec le pôle positif de la pile, et de l'autre, avec le levier *CD*.

L'électro-aimant *A* étant mis de son côté en rapport avec le pôle positif de la pile et le levier *EF*, voici ce qui a lieu au moment des deux oscillations contraires de la boule *M*.

Supposons que le pendule *M* commence son oscillation descendante et que le levier *EF* appuie sur le buttoir *GI*, le courant sera fermé à travers l'électro-aimant *A*, car il ira de *X* en *A*, de *A* en *EF*, et reviendra en *Y* par le buttoir *GI*. D'un autre côté, l'électro-aimant *T* sera également actif, car le circuit dans lequel il est interposé est complété par le contact de *CD* avec *DH*. Sous l'influence de l'électro-aimant *A*, la boule *M* sera attirée, et au moment où elle

1. Ce rhéotome a été employé par MM. Foucault et Froment dans leur appareil pour la démonstration de la déviation du pendule sous l'influence de la rotation de la terre.

passera au-dessus de l'électro-aimant, elle réagira sur lui en le soulevant dans son étui ; mais ce soulèvement entraînera la rupture du circuit de l'électro-aimant T, puisque le levier CD est réuni à A par le crochet AK. D'un autre côté, la rupture du circuit de l'électro-aimant T entraîne celle du circuit de l'électro-aimant A, car ce dernier circuit est complété par le contact de EF sur GI. Il en résulte que l'électro-aimant A retombe dans sa position primitive et remet le levier CD en contact avec le buttoir DH. Si le système d'engrenages sur lequel réagit le cliquet LF n'existait pas, le levier EF serait immédiatement mis en contact avec le buttoir GI ; car, par le fait du contact de CD avec DH, le courant est fermé au travers de l'électro-aimant T ; mais à cause de ce système d'engrenages, il faut un certain temps pour que l'attraction de l'armature O soit effectuée, et ce temps, en rapport avec celui que mettent les rouages à défilier, peut être réglé au moyen du volant M. On peut donc de cette manière prolonger l'interruption du courant aussi longtemps qu'on le desire, et de manière à correspondre à l'oscillation ascendante du pendule.

Quand le défilement des rouages s'est effectué, le courant est de nouveau rétabli dans l'électro-aimant A, et la réaction électrique se continue comme nous l'avons déjà dit.

On comprend que, par l'intermédiaire d'un mouvement d'horlogerie, le problème aurait pu être résolu sans l'intervention du second électro-aimant T. Car ce mouvement d'horlogerie aurait pu être commandé par le levier CD, et celui-ci, une fois soulevé, ne serait retombé qu'après un tour complet de limaçon. Or, comme ce tour de limaçon aurait pu être réglé comme le défilage des rouages dans le système précédent, le problème aurait pu être ainsi immédiatement résolu.

Troisième système. Les différents systèmes de rhéotomes que nous venons de passer en revue ont pour but de pro-

longer l'action électro-magnétique pendant un temps voulu : nous allons maintenant étudier d'autres rhéotomes dont l'action, au contraire, sera de la détruire à un moment donné pour la reporter ailleurs.

Le plus simple de ces rhéotomes est celui qui, par une communication de l'électro-aimant avec son armature, permet que le courant soit rompu par le mouvement de celle-ci. Alors cette armature, sollicitée par son ressort antagoniste, revient à sa position initiale. Dans ce cas, il peut arriver deux choses : ou le courant restera établi comme il l'était au moment de l'attraction de l'armature, ou il aura été interrompu par une cause quelconque. Quand les combinaisons du circuit ne changent pas, il se détermine un mouvement de vibration indéfini.

En effet, si le pôle positif de la pile aboutit à l'un des bouts du fil de l'électro-aimant, tandis que l'autre bout de ce fil communique à l'armature BC (fig. 12), il arrive que le buttoir D étant mis en rapport avec le pôle négatif de la pile, l'armature CB se trouve attirée au moment de son contact avec D; mais aussitôt que l'attraction s'est manifestée, le ressort antagoniste prend le dessus et la ramène contre le buttoir D, qui réagit en provoquant une nouvelle attraction, laquelle attraction entraîne une nouvelle interruption du courant, et ainsi de suite indéfiniment¹.

La figure 13 représente un rhéotome du même genre, mais combiné de manière à ce que la pesanteur soit la force antagoniste; il est spécialement appliqué aux appareils d'induction construits par M. Ruhmkorff. Il se compose essentiellement d'un levier ED terminé par une plaque de fer D qu'on appelle le *marteau*, et d'un ressort AB terminé par un cylindre massif de cuivre B que l'on appelle

1. Ce rhéotome, imaginé par M. de la Rive, est employé dans une foule d'appareils, particulièrement dans les machines de Ruhmkorff et les sonneries électriques de Mirand.

enclume. Ce ressort, fixé par la vis A sur l'une des lames servant de conducteur au courant, peut être plus ou moins élevé au-dessus de la planche-support par la vis de pression C. L'enclume B porte, soudée à sa partie supérieure, une petite rondelle de platine bien polie. Il en est de même de l'appendice J placé sous le marteau, et qui, en temps ordinaire, est en contact avec l'enclume.

Le levier ED du marteau est fendu en G d'une coche angulaire qui, en s'enfourchant sur un chevalet angulaire en forme d'angle dièdre construit à l'extrémité de la colonne GI, lui sert d'articulation. Les vis K et E servent à fixer un petit fil d'argent destiné à établir une communication métallique parfaite entre le marteau et la colonne GI. Enfin la vis H sert de point d'attache au fil LH de l'hélice conductrice qui sort de ce côté. Le jeu de ce rhéotome est le même que celui que nous avons précédemment décrit : quand l'appendice J du marteau touche l'enclume B, le courant est fermé, puisque le fil LH est en rapport direct avec l'un des pôles de la pile et que le ressort AB communique à l'autre pôle. Sous l'influence de ce courant, le faisceau de fils de fer placé à l'intérieur de la bobine, et dont un bout se voit en M, se trouve aimanté, et le marteau D est soulevé. Mais, étant soulevé, ce marteau rompt la communication métallique entre l'enclume B et l'appendice J; le courant cesse donc de circuler, et, partant, le fer, n'étant plus aimanté, laisse retomber le marteau, qui rétablit alors le courant, ce qui motive une nouvelle ascension du marteau, puis une nouvelle interruption du courant, et ainsi de suite, avec une accélération d'autant plus grande que la distance entre le marteau D et la rondelle M est plus petite.

En prenant un ressort un peu fort pour servir de point d'attache à l'armature BC (fig. 12), M. Froment a pu obtenir des appareils produisant des sons plus ou moins aigus,

et donnant les différents tons de la gamme. Cet appareil peut être employé pour étudier les différentes variations qui peuvent survenir dans l'intensité d'une pile, et apprécier approximativement le degré de force des différents éléments, comme nous le verrons dans le 7^e chapitre.

Quand, à la suite de l'attraction de l'armature, les combinaisons électriques se sont trouvées changées, l'armature revient s'appliquer contre son buttoir, après avoir accompli un mouvement très-peu étendu. Ce système, livré à lui seul, n'est guère susceptible d'applications. Mais il n'en est plus de même si on fait en sorte qu'à la suite de cette interruption le courant soit renvoyé dans d'autres circuits. Nous avons déjà vu un exemple de cette nature dans le rhéotome de M. Froment. Nous allons en étudier d'autres plus simples dans leurs combinaisons électriques.

Premier exemple. Supposons qu'on veuille transmettre un courant à travers un certain nombre d'électro-aimants A, B, C (fig. 14), etc., mais que la force électrique n'étant pas suffisante pour les mettre tous en fonction, on soit obligé d'agir sur eux séparément et successivement, en n'employant pour cela que les deux fils du circuit ¹. Voici comment on disposera les rhéotomes :

Le fil positif du circuit ira s'attacher à l'un des bouts du fil de chacun des trois électro-aimants A, B, C, dont les armatures communiqueront séparément avec le bout libre de ce même fil. Des ressorts R, R', R'', buttés contre chacune de ces armatures, auront leur point d'attache en rapport avec des buttoirs d'arrêt S, S' S'', appartenant respectivement au système électro-magnétique qui précède, sauf le premier R qui sera en rapport direct avec un interrupteur, interposé sur le fil négatif du circuit.

Les appareils étant ainsi disposés et l'interrupteur ayant

1. Ce système de rhéotome a été employé par moi pour un procédé d'inflammation des mines.

été mis en jeu, tous les appareils A, B, C, seront mis en action successivement. En effet, le courant passant d'abord par l'électro-aimant A et son armature, revient à la pile par le ressort R; sous l'influence de ce courant l'armature de A est attirée; mais le ressort R, en se décrochant, coupe le courant dans le circuit de A, et le reporte dans le circuit de B, par son contact avec le buttoir S, contact qui place le système B dans les mêmes conditions que le système A, avant le décrochage de R. Par le même effet, le courant sera donc coupé dans le circuit de B et reporté dans le circuit de C, et ainsi de suite pour un nombre indéfini d'électro-aimant.

Deuxième exemple. Si, dans l'exemple précédent, on voulait qu'un courant, après avoir mis successivement en fonction des électro-aimants A, B, C, (fig. 14), puisse recommencer à agir sans qu'on soit obligé de raccrocher les ressorts détendus, un système mécanique devrait être ajouté au rhéotome. Voici en quoi il pourrait consister ¹.

Les électro-aimants sur lesquels devra agir successivement le courant, seront placés, je suppose, en A, B, C, (fig. 15), et l'interrupteur commandant ces électro-aimants sera en I. Deux ressorts DE, FG placés sur ces interrupteurs, communiqueront, l'un avec un frotteur HL, appuyant sur une roue à cames MN, l'autre sur un pareil frotteur JK, disposé de manière que quand HL est sur le sommet d'une came, JK soit sur une dépression. Cette roue à cames MN est montée sur le même axe qu'une roue à rochet O, et se trouve mise, par cet axe et son support, en communication avec l'un des bouts du fil de l'électro-aimant. L'autre bout de ce fil se greffe sur un fil qui est commun à tous les autres électro-aimants. Enfin, les ressorts HL, JK, en se prolongeant, peuvent appuyer quand

¹ Ce système de rhéotome a été appliqué par M. Robert Houdin dans ses sonneries électriques.

ils se trouvent dans les dépressions de la roue à cames, sur deux pièces métalliques P, Q, qui communiquent aux ressorts H' L', J' K' de l'électro-aimant B, et qui jouent, par conséquent, le rôle des ressorts DE, FG, de l'interrupteur I. Il va sans dire que ce mécanisme est appliqué à tous les électro-aimants qu'il s'agit de mettre en marche. Voici alors ce qui arrive au moment où fonctionne sous l'influence d'un mécanisme quelconque l'interrupteur I.

Quand le ressort DE est sur le sommet de la dent de l'interrupteur, le frotteur HL est sur une came, et par conséquent, le courant passe au travers de l'électro-aimant A; l'armature de cet électro-aimant étant attirée, fait avancer d'un cran la roue à rochet O, qui en faisant avancer à son tour la roue à cames, fait retomber le ressort HL dans une dépression de cette même roue, et provoque par là un contact entre ce ressort et la pièce métallique Q. En même temps le ressort JK, qui était sur une dépression de la roue à cames, se trouve reporté sur une came et est séparé de la pièce métallique P.

Sous l'influence du contact du frotteur HL avec la pièce Q, le courant se trouve fermé à travers l'électro-aimant B, qui, en agissant de la même manière que l'électro-aimant A renverse le courant dans l'électro-aimant C, et ainsi de suite, jusqu'à ce que tous les appareils aient fonctionné.

Voilà donc un premier effet produit sous l'influence d'un même courant, passant successivement d'un appareil à l'autre. Voyons comment va s'opérer le second effet, quand l'interrupteur I aura tourné d'une dent.

Cette fois ce sera le ressort FG qui sera en contact avec l'interrupteur, tandis que le ressort DE sera dans un vide. Le courant se trouvera donc conduit au frotteur JK qui appuie en ce moment-là, comme nous l'avons vu, sur une came de la roue régulatrice. Par conséquent, l'électro-aimant A deviendra actif, et son armature, en réagissant

sur la roue à rochet, replacera le frotteur HL sur une came, en laissant retomber le frotteur JK dans une dépression ; mais la chute de ce dernier frotteur rétablit la communication entre l'interrupteur I et la pièce P ; le courant se trouve donc , de cette manière , renvoyé dans l'électro-aimant B. Alors les effets précédents se renouvellent , et auront pour conséquence la mise en action du troisième électro-aimant, et ainsi de suite jusqu'au dernier qui peut se passer de rhéotome.

Après cette seconde série de fermetures successives de courant, les appareils seront revenus dans leur première position, et les effets que nous avons étudiés pourront se renouveler tant que tournera la roue du commutateur.

Troisième exemple. Le problème réalisé par le Rhéotome précédent peut encore être résolu d'une manière beaucoup plus simple par l'intermédiaire d'un seul Rhéotome. Supposons, pour fixer les idées, qu'on veuille transmettre simultanément une dépêche à plusieurs appareils télégraphiques disséminés en différents points d'une ville ou dans les environs de grands centres télégraphiques auxquels ces appareils sont déjà reliés : il est évident que la force électrique sera insuffisante pour satisfaire à toutes ces bifurcations de courant, et pourtant il est nécessaire quand on veut agir à une certaine distance, de n'employer qu'un fil unique. La fonction du Rhéotome sera donc de multiplier à distance les transmissions fournies par l'interrupteur. Voici à cet effet comment je le dispose :

Qu'on imagine à la station centrale éloignée de la station qui transmet un appareil d'horlogerie M, fig. 16, dont le mouvement soit le plus accéléré possible, et qui ait pour effet mécanique de mettre en mouvement circulaire ou rectiligne un petit frotteur à piston A appliqué sur une planche d'ivoire fixe B C ; on concevra facilement que si cette plaque porte sur le parcours du piston autant de plaques métalli-

ques qu'il y a d'appareils à faire mouvoir; ce frotteur, à chaque révolution qu'il accomplira, pourra renvoyer successivement un même courant dans ces différents appareils. Or en admettant que le mécanisme d'horlogerie soit commandé par un électro-aimant T, interposé dans le circuit d'un relais ordinaire ou même dans le circuit de la ligne et que chaque attraction ait pour effet de permettre au frotteur piston d'accomplir une révolution entière, il arrivera que chaque fermeture de courant opérée sur le relais aura pour résultat une série de fermetures successives de courants à travers des circuits différents, fermetures qui pourront se succéder infiniment rapidement, puisque pour être efficaces elles n'ont pas besoin d'être en rapport avec les actions mécaniques produites.

Pour empêcher la confusion qui pourrait résulter du déclanchement trop lent ou trop prompt du mécanisme Rhéotomique, l'interrupteur doit être alors mis en mouvement par un mécanisme d'horlogerie calculé de manière à marcher d'accord avec le mécanisme du Rhéotome; de cette manière chaque révolution du frotteur est assurée de s'effectuer complètement.

Ce même système de Rhéotome peut être employé comme interrupteur, quand la transmission multiple doit se faire à partir de la station elle-même qui transmet. C'est le cas de la station de Paris quand il s'agit d'envoyer une grande nouvelle dans les départements. L'appareil peut alors se passer de relais et de l'électro-aimant commandant le Rhéotome.

Il y a déjà longtemps, M. Wheatstone avait proposé, pour résoudre ce problème, un appareil fondé sur la persistance de la déviation de l'aiguille du galvanomètre sous l'influence d'un courant interrompu à des intervalles excessivement rapprochés; mais l'isochronisme parfait de mouvement que ces appareils exigeaient et la lenteur de la transmission rendaient la solution de ce problème plutôt théori-

que que pratique. Quoi qu'il en soit, voici en quoi consistait le Rhéotome de M. Wheatstone :

Deux mouvements d'horlogerie parfaitement synchroniques, commandant chacun la marche d'un cylindre d'ivoire, étaient établis aux deux stations servant de centres télégraphiques. Sur chacun de ces cylindres d'ivoire A et B, fig. 17, étaient adaptés autant d'anneaux métalliques qu'il y avait de circuits à compléter, et ces anneaux, découpés en dents pointues, étaient disposés entre eux de manière que les pointes de ces dents fussent toutes placées en *retrait* les unes par rapport aux autres. De cette manière, des frotteurs fixes *a, b, c, d*, etc., d'égale longueur, appuyant sur les dents de ces différents anneaux, ne pouvaient jamais les rencontrer en même temps.

Les cylindres des deux appareils placés aux deux stations étaient construits d'une manière exactement semblable, et une seconde série de frotteurs, appuyant sur les parties pleines des anneaux, reliaient ceux-ci, soit avec les circuits des différents appareils sur lesquels on voulait agir, soit avec la pile.

Au moment de la fermeture du courant à la station qui transmettait, les deux mécanismes à mouvement synchronique étaient dégagés, et le courant se trouvait transmis aux différents anneaux : il se produisait alors autant de séries d'interruptions de courant qu'il y avait d'anneaux sur les cylindres ; mais à cause du mouvement synchronique des appareils, ces séries pouvaient être concordantes d'un appareil à l'autre pour les anneaux de même ordre. Or, comme en raison de la vitesse des moteurs ces séries de courants interrompus agissaient comme des courants continus, chacun des circuits en rapport avec le Rhéotome se trouvait sillonné par un courant individuel (non affaibli, puisque ces différents circuits étaient complétés les uns après les autres sous une même influence électrique initiale.

Quatrième exemple. Admettons qu'une bascule BC (fig. 19), après avoir repoussé par l'intermédiaire d'un piston X la bascule Y d'un commutateur à renversement de pôles, se trouve successivement remontée par l'action d'un électro-aimant, mis en fonction sous l'influence de ce commutateur; admettons encore que la bascule, étant tout à fait remontée, doive renverser le sens du courant pour remettre l'appareil en état de subir une nouvelle action, ayant pour effet le décrochement de la bascule BC : il est clair que, sans un rhéotome, la bascule du commutateur à renversement de pôles ne pourra jamais être reportée sur les plaques qui doivent renverser le courant; car l'action du remontage de la bascule BC cessant au moment de l'interruption du courant, aucune cause ne pourrait pousser la bascule commutateur Y sur les plaques en rapport avec l'action qu'elle doit désormais exercer. L'emploi d'un rhéotome dans ce cas est donc indispensable, et voici comment il peut être combiné ¹.

Un long ressort S, recourbé en col de cygne, appuie sur la branche de la bascule Y opposée à celle qui est poussée par le piston X. Une lame de ressort V, terminée par un crochet, permet d'embrider le ressort S dans une position donnée de la bascule; mais un levier coudé U, adapté au ressort V par l'intermédiaire d'une tige articulée qui traverse la planche du commutateur, peut, étant poussé, abaisser ce ressort et décrocher la lame en col de cygne S; celle-ci, en appuyant sur la bascule V, la repousse sur les lames C, D, et l'effet se trouve ainsi accompli. Pour obtenir que ce décrochage du ressort S se fasse en temps opportun, c'est la bascule elle-même qui, par l'intermédiaire de l'ergot T qu'elle porte, pousse le levier coudé U au moment où elle atteint son maximum de remontage.

1. Ce système de rhéotome a été employé par moi dans mon calendrier électro-magnétique.

Quand, par un effet électrique quelconque, la bascule BC retombe, le piston X pousse la bascule Y du commutateur sur les deux plaques qui doivent faire marcher le mécanisme du remontoir. Mais en accomplissant ce mouvement, cette bascule Y soulève le ressort S et le recroche sur le ressort à crochet V ; il en résulte que le piston X peut se relever avec la bascule BC, sans que la bascule Y le suive et empêche par là le remontage complet de la bascule BC.

Cinquième exemple. Un interrupteur de courant J (fig. 18) commande un mouvement d'horlogerie M (une sonnerie d'horloge, par exemple), dont l'effet peut être accompli avant la cessation de l'action interruptrice. Si on n'emploie pas de rhéotome, deux ou trois effets pourront être produits au lieu d'un, puisque la détente A restera soulevée sous l'influence de l'interrupteur. Par conséquent, le but qu'on se sera proposé ne se trouvera pas atteint. Il importe donc, dans ce cas, d'employer un intermédiaire qui coupe le courant fermé par l'interrupteur, et cet intermédiaire rhéotome peut consister, dans ce cas, dans un second interrupteur I, mis en mouvement par un moteur C, marchant infiniment plus vite que celui qui met en fonction l'interrupteur primitif ¹.

VI

DES ORGANES MÉCANIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE EMPLOYÉS DANS LES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ.

Les appareils que nous allons avoir à étudier dans ce chapitre, sont des combinaisons électro-mécaniques, à l'aide desquelles les effets produits par les électro-aimants et les autres organes électro-magnétiques que nous avons passés

1. Ce système de rhéotome a été appliqué par M. Royer dans son horloge électrique.

en revue précédemment, peuvent être utilisés mécaniquement, soit à conduire ou à commander un mouvement donné, soit à transformer en un mouvement quelconque l'effet d'attraction résultant de l'action physique elle-même, soit à transporter en temps voulu un mouvement d'un système dans un autre. On comprend, d'après cela, que si nous voulions entrer dans tous les détails qui se rattachent à cette question, nous aurions tout un cours de mécanique à exposer dans ce chapitre; mais nous ne considérerons que les systèmes mécaniques les plus usités dans les applications mécaniques de l'électricité.

ÉLECTRO-TRANSMETTEURS DE MOUVEMENT.

Les moyens fournis par la mécanique pour transmettre le mouvement sont, comme on le sait, les engrenages, les bielles, les courroies, les chaînes, les roues frottantes, les boîtes d'engrenage, les embrayeurs, etc., etc. Ces moyens, quand on doit produire un effet permanent, ne laissent rien à désirer, et par conséquent des appareils électriques employés dans le même but qu'eux, ne seraient d'aucune utilité. Mais si l'on considère que dans une foule d'applications mécaniques il est nécessaire de produire des transmissions de mouvement immédiates avec de très-faibles moyens d'action, alors on comprendra toute l'importance des électro-transmetteurs de mouvement. Supposons, en effet, qu'il s'agisse de produire, dans un instant donné, l'engrènement de deux roues, et que le jeu de la machine ne permette pas l'introduction de leviers articulés, à l'aide desquels on puisse les pousser l'une contre l'autre; ou bien supposons encore que, pour obtenir cet engrènement, on ne puisse disposer que d'une force excessivement faible, celle, par exemple, que pourrait fournir l'aiguille d'une montre: il est évident que, dans un cas comme dans l'autre, les moyens

fournis par la mécanique seraient complètement impuissants pour réaliser l'effet voulu. C'est précisément dans ces cas que doivent être employés les électro-transmetteurs de mouvement.

Les électro-transmetteurs de mouvement peuvent s'appliquer aux mouvements alternatifs et aux mouvements circulaires. Les plus simples de tous sont les électro-aimants circulaires de M. Nicklès, que nous avons représentés fig. 16 et 28, pl. II. Leur jeu est facile à comprendre : en temps ordinaire leur armature, constituée par un cylindre de fer doux, n'appuie pas contre les rebords de fer de l'électro-aimant. Alors celui-ci peut tourner, indépendamment de son armature, tout le temps que le courant ne circule pas au travers de son fil ; mais aussitôt que le courant réagit, l'attraction s'exerce entre les deux pièces métalliques et, en raison de la force d'adhérence et du frottement, le cylindre de fer est mis en mouvement de rotation. Ce mouvement dure tant que persiste le courant, mais aussitôt que celui-ci est interrompu, la force antagoniste qui est opposée à cette attraction ramène le cylindre de fer à sa position première.

Pour conduire le courant à l'électro-aimant circulaire, il suffit d'adapter sur l'axe de rotation de celui-ci deux bagues métalliques isolées l'une de l'autre sur un manchon d'ivoire, en ayant soin de mettre ces bagues en relation avec les deux extrémités du fil de l'électro-aimant. Ce sont alors deux frotteurs appuyant sur ces bagues qui établissent la communication électrique. (Voir fig. 4, pl. VI.)

Quand les électro-aimants circulaires sont employés dans les mêmes circonstances que des roues de fer, pour produire un effet mécanique basé sur la résistance due au frottement, ils peuvent fournir de grands avantages ; car, à cette force de résistance s'ajoute l'attraction magnétique, qui ne laisse pas que d'être alors très-puissante,

puisqu'elle s'exerce au contact. M. Nicklès a eu l'idée d'appliquer ce principe à l'exploitation des chemins de fer pour augmenter l'adhérence des roues motrices des locomotives aux rails. Cette question, comme on le comprend, est d'un haut intérêt, car si elle était complètement résolue, il deviendrait alors facile de graver les pentes, et les travaux d'art des chemins de fer seraient beaucoup moins coûteux.

Disons, toutefois, que les expériences de M. Nicklès, sur le chemin de fer de Lyon, ont médiocrement réussi ; mais à l'époque où elles ont été faites, l'aimantation des roues de la locomotive n'avait été faite que très-imparfaitement. Depuis, M. Nicklès a trouvé, dans ses électro-aimants circulaires que nous avons décrits, un effet magnétique beaucoup plus énergique, puisque la roue aimantée peut agir alors par ses deux pôles à la fois sur l'armature représentée par les rails. Espérons qu'on reprendra prochainement ces expériences, et que cette fois elles réussiront.

Les électro-aimants circulaires n'ayant d'autre puissance à opposer à la résistance que la force d'adhérence due au frottement sur un point et leur action magnétique, ont nécessairement une force de transmission très-bornée. Pour rendre cette force aussi puissante que celle qui est produite par les intermédiaires mécaniques employés ordinairement à cet usage, M. Achard a eu l'idée de faire de l'électro-aimant lui-même un *embrayeur* susceptible d'être entraîné par son armature au moment où celle-ci, qui serait adaptée au moteur, viendrait à lui présenter un obstacle matériel contre lequel l'attraction électrique le forcerait de butter. De cette manière, la force motrice se trouve intégralement transmise.

Les fig. 2 et 3, pl. VI, représentent ce système d'électro-transmetteur de mouvement.

Dans la fig. 1, M, est une roue tournant dans le sens indiqué par la flèche. La circonférence extérieure, com-

posée de fer doux, est taillée en spirale avec un rebord arrondi N. Un électro-aimant O, ayant la faculté de s'approcher vers le centre de rotation, peut aussi tourner autour de l'arbre sur lequel il est adapté, comme une poulie folle. La partie de la spirale comprise entre le point N et le point N' frotte à chaque révolution contre les deux tourillons de l'électro-aimant O. Tant que l'électricité ne circule pas, ce frottement presque continu s'effectue impunément, l'électro-aimant est seulement légèrement repoussé dans le sens du rayon.

Une fois que la partie NN' a passé, l'électro-aimant ne touche plus la spirale; il occupe, par rapport à cette courbe, des positions semblables à celles représentées en O¹, O².

Mais sitôt que l'électricité circule, au moment du passage de la partie NN' qui frotte contre l'électro-aimant, il y a attraction entre ces deux pièces. La partie NN' ayant échappé en glissant contre l'électro-aimant, ce dernier continue à être attiré par la spirale, et s'approche du centre; la spirale, tout en glissant, continue à attirer l'électro-aimant et le force à occuper des positions semblables à celles indiquées en O³ et O⁴. Lorsque la spirale aura fait un tour entier, l'électro-aimant, toujours attiré de plus en plus vers le centre, occupera une position semblable à celle de O⁴. Alors le rebord N butte contre la pièce Q qui fait corps avec l'électro-aimant, et cet électro-aimant est désormais entraîné, avec toute la force du moteur M, qui lui transmet en même temps et sa puissance et sa vitesse sans interruption, jusqu'à ce que le courant électrique soit interrompu. A ce moment, l'électro-aimant cède au ressort antagoniste, la pièce Q se dégage du rebord N; l'électro-aimant reprend sa position O, O¹, O², et cesse de tourner avec la roue M.

Mais, j'ai hâte de le dire, cette disposition de l'embrayeur électrique a un défaut capital pour un mouvement à grande

vitesse ; elle a été décrite principalement en vue de rendre plus saisissable la description suivante de la fig. 3. Le mouvement de l'électro-aimant, en effet, s'effectuant vers le centre de rotation, dans le sens du rayon, serait soumis à l'action de la force centrifuge qui se développe proportionnellement au carré de la vitesse : or, cette force, dans le cas d'une grande vitesse, contre-balancerait la force d'adhérence de l'électro-aimant, et finirait par le détacher de l'armature en spirale, malgré la persistance du courant électrique.

Les dispositions représentées dans la fig. 3 annulent complètement les effets de la force centrifuge.

La roue M n'est plus taillée en spirale à la circonférence extérieure ; c'est la face inférieure qui a été taillée, non pas en spirale, mais en plan incliné circulaire, en hélice N², ne faisant qu'un seul tour entier. Le pas de cette hélice N² est égal à la hauteur du rebord N, fig. 2. La profondeur ou la largeur est égale à la largeur de la roue M, fig. 2. Elle se termine brusquement au pied du rebord SS', au sommet duquel elle commence ; l'électro-aimant T, mobile dans deux coulisses V, ne peut se mouvoir que dans le sens parallèle à l'axe de rotation, et par conséquent perpendiculaire à la direction de la force centrifuge. L'hélice N², en tournant, frotte, par sa partie la plus basse, contre les tourillons de l'électro-aimant T.

Tant que l'électricité ne circule pas, ce frottement contre l'hélice en fer doux ne change point la position de l'électro-aimant. Mais sitôt que l'électricité circule, l'électro-aimant est attiré par l'hélice qui le force à s'élever de plus en plus en glissant dans ses coulisses, et finit par l'engager dans le fond du rebord SS', dans une position semblable à celle de l'électro-aimant O⁴, fig. 2. A ce moment il est entraîné par le moteur M' qui lui transmet en même temps et sa force, et sa vitesse sans interruption, et sans que la force centrifuge puisse troubler cette solidarité.

L'électro-aimant de la fig. 3 est aussi muni d'une pièce semblable à celle Q de l'électro-aimant O de la fig. 2. On ne l'a pas figurée dans la fig. 3, parce qu'elle se présente à plat et cache les deux bobines de l'électro-aimant.

Voici maintenant comment est faite la liaison électrique dans ce système d'électro-transmetteur de mouvement.

Le fil *h*, qui aboutit à l'un des pôles de la pile, appuie constamment sur un cercle métallique isolé de la poulie, si elle est de métal; ce cercle *g* est en communication métallique avec le fil *f* qui se rend à la première bobine de l'électro-aimant en suivant la ligne *f d a*.

Le fil *h'*, qui aboutit à l'autre pôle de la pile, appuie aussi constamment sur le cercle métallique isolé *g'*. Ce cercle *g'* est en communication métallique avec l'extrémité *f'* du fil qui se dirige vers la seconde bobine en suivant la ligne *f' c b*.

Pendant la rotation de la poulie X, les deux cercles *g'* et *g* frottent constamment contre les deux fils aboutissant aux pôles de la pile. Les contacts sont ainsi constamment entretenus propres, ce qui assure la transmission électrique.

La fig. 4 représente un autre système d'électro-transmetteur de mouvement, susceptible de transmettre, soit un mouvement rectiligne alternatif, soit un mouvement circulaire alternatif, soit un mouvement circulaire continu produit par une suite d'efforts successifs séparés par des interruptions, mais agissant toujours dans le même sens. Ce système a été également imaginé par M. Achard.

A est un arbre fixe autour duquel peuvent osciller au besoin les deux pièces B et C. B est un levier à l'une des extrémités duquel se trouve solidement adapté un électro-aimant D. Entre l'électro-aimant D et l'arbre A se trouve un cliquet E, articulé sur le levier prêt à agir sur la roue à rochet G, contre laquelle il est pressé légèrement par l'effet du ressort H.

La pièce C, qui peut osciller aussi autour de l'arbre A, est munie à son extrémité d'un morceau de fer doux L, pouvant faire fonction d'armature par rapport à l'électro-aimant.

C'est à cette pièce C qu'est appliqué le moteur à embrayer. Elle est, comme ce moteur, constamment en mouvement. Dans la fig. 4, ce mouvement dont C est animé est un mouvement de va-et-vient circulaire alternatif. L'une des extrémités de ce mouvement aboutit à l'électro-aimant D.

A chaque oscillation de la pièce C, l'armature L va butter légèrement contre les deux tourillons de l'électro-aimant. Tant que l'électricité ne circule pas autour de l'électro-aimant D, ce dernier est inerte, l'armature peut le toucher impunément à chaque instant; mais sitôt que le courant électrique s'élance à travers le fil conducteur, cet électro-aimant devient actif. Au premier contact de l'armature, cette dernière est attirée, ou plutôt instantanément attachée à l'électro-aimant, et dans son oscillation en retour, elle l'entraîne avec elle, puisqu'il peut, comme elle, tourner autour de l'arbre fixe A. Les deux pièces deviennent solitaires et décrivent ensemble un mouvement de va-et-vient circulaire alternatif.

Examinons attentivement ce qui se passe pendant la première oscillation de l'électro-aimant. Au moment où il s'éloigne de sa position de repos, le cliquet E glisse sur la dent qu'il embrasse, et vient tomber en arrière dans le creux de cette dent. Le bras F s'avance et pousse devant lui la règle K en la faisant glisser dans ses coulisses I. Ces deux mouvements n'opposent que des résistances de frottement très-minimes comparées à la force d'adhérence de l'armature sur l'électro-aimant.

Cette première oscillation accomplie, l'armature en recommence une autre en sens inverse; elle ne tire plus

l'électro-aimant, elle le pousse devant elle avec toute la force qui lui est communiquée par le moteur qui agit sur elle. Par suite, le cliquet E fait tourner de l'intervalle d'une dent la roue à rochet G, et le bras F ramène la règle K à sa position primitive. Ces deux derniers mouvements, ne dépendant plus de la force attractive de l'électro-aimant, peuvent être employés à vaincre des résistances aussi considérables qu'on le voudra, pourvu que le moteur appliqué à la tige de l'armature (c'est-à-dire le moteur à embrayer) ait une force suffisante.

On voit donc que ce dernier embrayeur transmet : 1° un mouvement rectiligne de va-et-vient, c'est le mouvement de la règle K ; 2° un mouvement circulaire alternatif, c'est le mouvement du levier porteur de l'électro-aimant ; 3° enfin un mouvement circulaire continu, c'est celui de la roue à rochet.

M. Achard a encore imaginé un autre électro-transmetteur de mouvement auquel il a donné le nom d'Embrayeur hélicoïdal, et qui a pour but de transmettre un long mouvement rectiligne.

Dans cet électro-transmetteur, le moteur est une vis sans fin sur laquelle peut courir un écrou, dont le pas de vis est remplacé par une petite cheville portée par l'armature d'un électro-aimant. Cet électro-aimant est fixé sur l'écrou, et par conséquent peut réagir pendant toute la durée du mouvement de celui-ci. Pour que le mouvement qui met en action l'embrayeur puisse réagir sur lui dans les deux sens opposés, M. Achard a construit la vis sans fin de l'appareil de manière à présenter deux filets croisés, dont la fonction a dû être assurée par une disposition particulière. Cette disposition consiste dans une petite rainure droite pratiquée sur le cylindre de la vis, normalement à son axe, au point de départ des deux filets. C'est à cette petite rainure, qui occupe la moitié de la circonférence de la vis,

qu'aboutissent, d'un côté et de l'autre, les deux filets. Il en résulte qu'un mouvement accompli de gauche à droite, ou de droite à gauche, peut engager la cheville de l'écrou d'embrayage dans l'un ou l'autre des deux pas de vis.

Quand il ne s'agit que de faibles forces à transmettre, l'armature portant la cheville d'embrayage pourrait soulever celle-ci au-dessus des filets de la vis, sous l'influence d'un ressort antagoniste; et le courant électrique, étant fermé à travers l'électro-aimant, aurait pour effet de faire engager cette cheville dans la rainure qui donne naissance aux deux filets, effet qui serait d'ailleurs effectué en temps opportun par l'intermédiaire d'un rhéotome; mais quand la force à transmettre est plus puissante, ce moyen pourrait n'être pas suffisant, et M. Achard a préféré avoir recours aux effets d'attraction au contact. Pour cela il a adapté à l'axe de la vis sans fin une petite came qui a pour fonction de soulever et d'abaisser alternativement, en temps opportun, la cheville d'embrayage dans la rainure des filets. Quand l'électro-aimant est inerte, l'oscillation de la cheville et de l'armature s'effectue librement; mais quand il devient actif, la cheville reste engagée dans la rainure et, en suivant le pas de vis qui correspond au mouvement dont est animé l'arbre moteur, elle entraîne l'écrou jusqu'à ce que la course ait été entièrement accomplie. Alors l'armature de l'électro-aimant se trouve ou forcément arrachée par le moteur par suite de la terminaison du pas de vis qui remonte, ou éloignée librement par la disjonction de deux ressorts en rapport avec le courant.

On comprend facilement qu'avec ce système d'embrayeur on peut transmettre de longs mouvements circulaires alternatifs. Il suffit pour cela d'articuler à l'écrou mobile un long levier à rainure sollicité par un ressort antagoniste à boudin. Celui-ci rappelle alors l'écrou à son point de départ quand il a accompli sa course.

RÉPARTITEURS ÉLECTRIQUES.

La force d'attraction électro-magnétique croît, comme nous l'avons déjà dit, dans une progression énorme, qui dépasse même la troisième puissance de la distance, quand la pièce qui est soumise à cette attraction arrive très-près de son point de contact avec l'aimant. Or, une pareille force réagissant sur des pièces mécaniques de certaines dimensions, doit nécessairement entraîner des perturbations fâcheuses dans leur jeu. Pour prévenir ces perturbations, on a proposé plusieurs systèmes mécaniques auxquels on a donné le nom de *répartiteurs électriques*.

Dans sa construction la plus simple, un répartiteur électrique pourrait consister dans une lame de ressort AB (fig. 5, pl. VI), appliquée comme force antagoniste et disposée de manière à devenir de plus en plus rigide à mesure que l'armature de l'électro-aimant accomplit sa course. Pour obtenir ce résultat, il suffirait d'un certain nombre de vis de rappel C, D, E, etc., placées au-dessus du ressort AB, à des distances du point A qui seraient comme les nombres 1, 4, 9, 16, 25, etc. En réglant convenablement ces vis, on pourrait faire en sorte qu'une fois le premier tiers de la course de l'armature accompli, la vis C rencontrât la lame de ressort AC. La flexibilité de cette lame se trouverait donc réduite dans le rapport de AB à BG, et par conséquent la résistance opposée à l'attraction serait augmentée au moment où l'armature accomplirait le second tiers de sa course dans un rapport correspondant, c'est-à-dire de 1 à 4.

Après ce second tiers de la course accompli, le ressort AB étant bridé par la vis D, la résistance antagoniste se trouverait augmentée dans le rapport de AB à IB ou de 1 à 9. Enfin, au moment où l'armature aurait accompli sa

course entière, le ressort AB étant raccourci d'une longueur AJ, présenterait une résistance seize fois plus grande. On voit donc que par ce système la force attractive de l'électro-aimant se trouverait parfaitement régularisée sur toute l'étendue de la course de son armature.

Dans la fig. 5 nous n'avons représenté que trois vis d'embrayage. Mais il est facile de concevoir qu'en les multipliant, on rendrait plus régulière la marche du système.

M. Callaud, inventeur de ce mode de répartiteur, prétend qu'avec cinq vis on peut obtenir une régularité suffisante dans la plupart des applications mécaniques de l'électricité.

Répartiteur électrique de M. Robert-Houdin. — Dans le répartiteur que nous venons d'étudier, la régularisation de l'action attractive se fait au détriment de la force elle-même, c'est-à-dire que pour obtenir l'uniformité de cette action attractive, on est obligé de la réduire et de la maintenir à son minimum d'effet. Or, un pareil moyen n'est guère admissible en bonne mécanique, et on a dû rechercher s'il n'y aurait pas possibilité d'utiliser d'une manière quelconque cet excès de force que l'on est obligé de supprimer. MM. Robert-Houdin et Froment ont résolu complètement le problème, et à l'aide de leurs *répartiteurs* on peut utiliser cet excès de force nuisible, soit au renforcement de l'action magnétique initiale, soit au développement de l'amplitude de la course accomplie par les pièces mobiles. Le répartiteur, dans ce cas, remplit donc bien les fonctions que son nom indique.

Le répartiteur de M. Robert-Houdin se compose de deux leviers arqués DO, D' O' (fig. 6, pl. VI), réagissant l'un sur l'autre et servant d'intermédiaire entre l'armature de l'électro-aimant et l'organe mécanique sur lequel elle doit réagir. Ces leviers arqués, appuyant l'un sur l'autre par leur partie convexe, peuvent en basculant déplacer leur

point de contact et, par conséquent, changer successivement la longueur du bras de levier auquel est appliquée la *puissance motrice*. Par cela même, cette puissance se trouve changer elle-même de valeur dans une progression qui dépend de la rapidité du déplacement du point de contact des deux leviers. En calculant donc la courbe convenablement, on peut faire en sorte que la force opposée à la puissance contre-balance l'accroissement de la force magnétique. Nous allons voir maintenant comment cette force antagoniste peut être utilisée.

Nous supposons d'abord que quand l'armature de l'électro-aimant est au point le plus éloigné de sa course, les deux leviers DO, D' O' sont dans la position indiquée fig. 6. Ces leviers pivoteront l'un en D, l'autre en D', et les points d'application de la puissance P et de la résistance R, seront en K et en K'. Par la puissance P, nous entendons la force d'attraction exercée en P sur l'armature, et par la résistance R la force opposée par le mécanisme à faire mouvoir, laquelle est reportée en K' par la bielle RK'.

Dans la position des deux leviers sur la figure, le point de contact des deux courbes est en C, et si on suppose $DC = DK$, on peut considérer la puissance comme réagissant directement à l'extrémité du levier D' C'. Par rapport à la résistance R, la puissance aura donc gagné à cette disposition une augmentation de force représentée par le rapport de D'O' à DC. Par conséquent, dans le premier moment de son attraction l'armature P réagira sur les mécanismes à faire mouvoir avec une force beaucoup plus grande que si la résistance R eût été appliquée directement en P. A mesure que cette armature s'abaissera, le point de contact C s'éloignera de D, et le levier sur lequel réagira la puissance diminuera en même temps que le levier de transmission DC augmentera; la puissance devra donc, pour exercer le même effet sur la résistance R, augmenter dans

un rapport considérable. Or, c'est précisément ce qui arrive dans l'attraction électro-magnétique, puisque celle-ci croît dans le rapport complexe du carré de la distance. Donc, sans rien perdre de l'étendue de la course de l'armature d'un électro-aimant, on peut répartir par ce moyen la force électro-magnétique de manière à ce qu'elle se trouve renforcée au moment où elle est le plus faible, et affaiblie au moment où elle devient trop énergique. Sans doute, au moyen d'une simple bascule on aurait pu produire le premier de ces deux effets, mais, outre que par ce moyen on n'aurait pas régularisé la force attractive, on aurait diminué la course des pièces mobiles, ce que l'on doit chercher avant tout à éviter.

L'effet du répartiteur électrique de M. Robert-Houdin est tel, qu'une armature qui ne pouvait soulever directement une soixantaine de grammes à un centimètre de distance de son électro-aimant, a pu, par son intermédiaire, enlever jusqu'à un kilogramme.

Tel qu'il avait été conçu dans l'origine par M. Robert-Houdin, ce système de répartiteur ne présentait pas des courbes en rapport avec l'action électro-magnétique. Mais en le soumettant au calcul, j'ai pu facilement déduire la méthode qu'il faut suivre pour son tracé.

Les éléments qui déterminent la forme des leviers OD, O'D' dépendent de la distance de l'attraction et de la longueur du bras de levier DG, auquel est appliquée la puissance. Supposons, par exemple, que cette longueur soit de 12 millimètres, et que la distance de l'attraction soit de 9 millimètres, voici comment je tracerai l'épure de mes courbes.

Sur une droite indéfinie AB je prendrai une distance DE égale à 12 millimètres, et sur une perpendiculaire EG élevée au point E sur AB, je prendrai une longueur EG égale à 9 millimètres que je diviserai en trois parties égales GK,

KL, LE. Des points G, K, L, je mènerai par le centre D les droites GO, KI, LJ.

Du point D comme centre, et avec la longueur DE pour rayon, je décrirai un arc de cercle qui coupera les lignes LJ, KL, OG en trois points m , n et o , et à partir de ces trois points je prendrai sur ces lignes des distances Mm , Nn , Oo égales aux demi-carrés des nombres 3, 6, 9, c'est-à-dire à $4^{\text{mm}} \frac{1}{4}$, 18^{mm} , $40^{\text{mm}} \frac{1}{4}$. La courbe passant par les points C, M, N et O sera la courbe cherchée.

En effet, si l'on découpe les deux leviers l'un sur l'autre, et qu'on les place de manière que le point O' du second levier $D'O'$ vienne toucher le point C du premier levier, lorsque la ligne des centres de ces deux leviers coïncidera avec la ligne AB; les points M, N et O du levier DQ , arrivés successivement à la hauteur de la droite AB, rencontreront la courbe du levier $D'O'$ en différents points qui limiteront des bras de levier respectivement égaux à $D'O' - 4^{\text{mm}} \frac{1}{4}$, à $D'O' - 18^{\text{mm}}$, enfin à $D'O' - 40^{\text{mm}} \frac{1}{4}$.

Or, comme le passage des points M, N et O sur la ligne AB correspond aux trois tiers de la distance d'attraction, il s'ensuit que le levier de la puissance, par suite de son abaissement, fait décroître cette force dans le rapport des demi-carrés des distances qu'il parcourt successivement, tandis que l'autre levier, auquel est appliquée la résistance, fait croître celle-ci dans le même rapport. Le résultat final est donc un décroissement de la puissance dans le rapport des carrés des distances parcourues par les leviers. Or, comme la force électro-magnétique appliquée à ces leviers, croît dans le même rapport, on se trouve bien avoir équilibré cette force pendant toute la durée de son action.

Quand on veut faire de ce système mécanique un appareil de précision pour déterminer les lois d'accroissement de la force électro-magnétique dans différentes circon-

stances d'expérimentation, il importe de bien équilibrer les leviers, afin que le poids inégal de leurs branches n'intervienne pas dans les résultats que l'on obtient.

Répartiteur de M. Froment. — Le répartiteur de M. Froment est fondé sur ce principe de mécanique, que si deux leviers articulés AB, BC, fig. 7, servent d'intermédiaire entre la résistance appliquée au point d'articulation B, et la puissance agissant au point C de manière à redresser le système infléchi ABC, la force qui devra être employée pour ramener le point B en D, devra croître dans un rapport tellement considérable, à mesure que la flèche BO diminuera, qu'elle devra se rapprocher de l'infini dans le voisinage du point D. Si on calcule convenablement l'angle d'inflexion des deux leviers AB, BC, on peut donc arriver à obtenir une résistance croissante dans le même rapport que la puissance; de sorte qu'en adaptant en C l'armature de l'électro-aimant, le problème de la régularisation de la force attractive se trouve ainsi résolu.

D'un autre côté, si l'on considère que le mouvement accompli dans le sens de ADC par l'armature OC représente la somme des deux flèches des arcs décrits par les deux leviers, tandis que le mouvement transmis à la tige EB qui réagit sur les mécanismes à faire mouvoir, représente le sinus de ces arcs, on arrive à conclure que, par ce système de répartiteur non-seulement on égalise la force attractive, mais encore on amplifie d'autant plus la course des pièces mobiles que les leviers AB, BC sont plus longs. Ce résultat permet par conséquent de rapprocher, *aussi près* qu'on le veut, les armatures des électro-aimants, ce qui est un avantage immense, puisqu'on bénéficie alors de toute la puissance d'action de ceux-ci.

Si l'on rapproche l'un de l'autre les deux répartiteurs que nous venons d'étudier, on reconnaît que leur but final est le même, c'est-à-dire qu'ils permettent d'utiliser l'excès de

force de l'attraction électrique à l'amplification de la course des pièces mobiles; seulement dans l'un cette amplification résulte du plus grand écartement que l'on peut donner aux pièces qui subissent l'attraction, tandis que dans l'autre elle résulte du système mécanique lui-même.

En renversant les données du problème, ces deux répartiteurs pourraient avoir pour but de renforcer l'action attractive elle-même. En effet, en supposant qu'on ne veuille pas amplifier la course des pièces mobiles, et qu'on maintienne la distance de l'attraction toujours la même, le répartiteur de M. Robert-Houdin aurait pour effet d'augmenter considérablement la force attractive, au moment où l'armature serait la plus éloignée de l'électro-aimant, et le répartiteur de M. Froment, par la grande course qu'il donnerait aux pièces mobiles, permettrait d'employer un levier intermédiaire; qui, en diminuant l'étendue de cette course, renforcerait l'action attractive. Ainsi, ces deux répartiteurs, quoique bien différents dans leurs fonctions comme dans leur principe, peuvent être employés concurremment dans les mêmes circonstances.

REMONTOIRS ÉLECTRIQUES.

Il arrive fréquemment, dans les applications mécaniques de l'électricité, que l'on ait à réagir sur des mobiles qui ont besoin, pour être mis en action, d'une course d'une certaine étendue et de beaucoup supérieure à celle que peuvent leur fournir les répartiteurs électriques. Pour résoudre alors le problème, il devient essentiel d'employer des mécanismes intermédiaires, et ce sont ces mécanismes auxquels j'ai donné le nom de *remontoirs électriques*.

Les remontoirs peuvent être simples ou *rhéotomiques*, à double effet ou à simple effet.

Remontoir de M. Th. du Moncel. — Dans toute sa simpli-

cité, le remontoir que j'ai employé dans plusieurs de mes appareils électro-magnétiques, se compose : 1° d'une crémaillère arquée EF, fig. 8, adaptée au mobile qu'il s'agit de soulever, et sur laquelle réagissent deux crochets d'encliquetage IJ, HL, l'un articulé sur l'armature d'un électro-aimant, l'autre adapté à un support fixe ; 2° d'un système d'interrupteur mis en activité par le pendule d'une horloge ordinaire ; 3° d'une tige de *détente* PQ dépendant d'un autre système électro-magnétique et servant à dégager dans un moment donné la crémaillère EF ; 4° d'un rhéotome analogue à celui de la figure 19, pl. V, au moyen duquel le courant se trouve coupé et transporté du circuit de l'électro-aimant M du remontoir dans celui de l'électro-aimant T de la détente.

Le jeu de ce remontoir s'explique facilement : sous l'influence des fermetures successives du courant, opérées par le balancier de l'horloge, l'armature VJ se trouve alternativement attirée, et le crochet IJ, en suivant le mouvement de cette armature, abaisse d'une dent à chaque attraction, la crémaillère EF. Cet abaissement se trouve assuré par le cliquet de *repos* HL, qui est placé exactement au-dessous du cliquet IJ, et dont la cheville N entre seule dans les dents de la crémaillère. Quand le mobile qui, dans l'exemple que nous avons choisi, est une bascule sollicitée par un poids B, est entièrement remonté, le rhéotome entre en fonction, comme nous l'avons expliqué page 306, et renvoie le courant dans le circuit de l'électro-aimant T où il opère en temps et lieu le déclenchement de la crémaillère EF.

Si la force nécessaire pour remonter la bascule AB ne pouvait être fournie par l'électro-aimant M, on pourrait interposer entre la crémaillère EF et les cliquets IJ, HL, un système d'engrenages plus ou moins compliqué, mais qui serait commandé par une roue à rochet sur laquelle

réagiraient alors les cliquets IJ et HL. Dans ce cas, la crémaillère EF, au lieu d'avoir des dents de rochet, serait munie de dents pointues, et la tige de détente PQ, au lieu de réagir directement sur les cliquets IJ, HL, aurait pour fonction de repousser l'axe du dernier mobile avec lequel s'engrènerait la crémaillère. C'est ce dernier système de remontoir que j'ai employé dans mon calendrier électromagnétique dont je parlerai dans le prochain volume.

Il est facile de comprendre que les deux électro-aimants M et T, que j'ai représentés séparément dans la figure 8, pourraient être réduits à un seul en leur adaptant des armatures aimantées.

Remontoir de M. Froment. — Dans le remontoir précédent, l'action qui détermine le remontage du mobile est un mouvement indépendant de l'action électrique produite. M. Froment a cherché à opérer ce remontage sans aucun intermédiaire étranger au mécanisme électro-magnétique, et pour cela il a eu recours au rhéotome de Delarive que nous avons décrit page 298. Il a employé ce système de remontoir pour augmenter la course des marteaux de ses sonneries électriques.

Pour qu'on puisse comprendre facilement le jeu de ce mécanisme, imaginons un électro-aimant M, fig. 9, disposé en rhéotome de Delarive, c'est-à-dire, avec une armature mise en rapport avec l'hélice magnétisante et buttée contre une lame de ressort AB, à laquelle aboutit un des pôles de la pile. Il résultera de cette disposition un mouvement de vibration, très-petit à la vérité, mais qui, étant reporté par le cliquet CD sur une roue OD dentée *très-finement*, suffira pour la faire tourner. Si donc l'axe de cette roue porte une excentrique à limaçon OR, sur laquelle appuiera l'extrémité de la bascule PQ, cette bascule se trouvera successivement écartée jusqu'à ce qu'elle tombe dans la coche du limaçon. Alors la quantité dont pourra être remonté le mobile, dé-

pendra du diamètre de l'excentrique et de la longueur du levier PS.

Ce système de remontoir, comme on le comprend aisément, n'est pas susceptible d'être appliqué à des mobiles qui exigent, pour être soulevés, une certaine force, car les attractions qui réagissent sur le rochet s'effectuent toutes à leur minimum d'effet.

Du reste, si on voulait l'employer dans les mêmes cas que le remontoir précédent, il faudrait lui adapter un rhéotome et une détente; mais comme le fonctionnement de cet appareil n'est pas très-sûr, il vaut mieux ne l'employer que dans les circonstances où il ne s'agit que d'amplifier la chute d'un mobile.

ÉCHAPPEMENTS ET DÉTENTES.

La force électro-magnétique peut intervenir dans les réactions mécaniques qu'elle est appelée à produire comme force *régulatrice* d'un mouvement indépendant, ou comme force *créatrice* de mouvement. Dans le premier cas, les organes intermédiaires destinés à opérer la fonction électro-mécanique constituent ce que nous appellerons les *échappements* et les *détentes*. Dans le second cas, ces intermédiaires constituent les *transformateurs* de mouvement.

Détentes. — Quand il ne s'agit que de mettre en fonction et d'arrêter un mouvement d'horlogerie sous l'influence électrique, sans que ce mécanisme soit soumis à aucun contrôle depuis le moment où il est mis en action jusqu'à l'instant où il est arrêté, une simple détente peut suffire, et cette détente peut consister dans un buttoir adapté à l'armature de l'électro-aimant, ou sur une des pièces attenantes à cette armature, de manière à servir en temps ordinaire de point d'arrêt à un autre buttoir fixé sur l'un des mobiles du mécanisme. Ces buttoirs doivent être généralement

taillés en biseau, comme on le voit fig. 10, afin que l'arrêt soit plus sûr et ne provoque pas la flexion de l'armature, alors qu'elle n'est sollicitée que par son ressort antagoniste. De plus, ils doivent être en acier bien poli sur la tranche où se fait l'arrêt, afin que le dégagement soit plus doux et plus facile. Le point d'application des buttoirs sur les mobiles dépend de tant de considérations, qu'il serait impossible de formuler une règle à cet égard. Cependant, on peut dire, d'une manière générale, qu'il faut, autant que possible, placer les buttoirs d'arrêt sur le mobile qui tourne le plus vite, car c'est sur ce mobile que la force mécanique offre le moins de résistance à l'action électrique. Dans les appareils délicats qui doivent marcher sous une influence électrique extrêmement faible, il faut donc multiplier le plus possible le nombre des mobiles, alors même qu'on n'aurait pas besoin d'une grande vitesse pour opérer la fonction mécanique que l'on désire obtenir. On emploie alors au jeu de l'appareil celui des mobiles dont la vitesse est convenable, et on place la détente sur le dernier mobile.

Souvent on emploie dans les mécanismes d'horlogerie des volants ou des ailettes pour régulariser et tempérer un mouvement. Quand ces volants sont placés sur le dernier mobile, ils acquièrent une telle vitesse que leur arrêt, brusque et instantané, pourrait briser ou du moins altérer la détente qui s'oppose ainsi à leur mouvement. Pour éviter cet inconvénient on adapte à l'axe du mobile une petite roue à rochet sur laquelle appuie un cliquet à ressort fixé sur le volant (voir fig. 11). Quand la détente permet au mécanisme d'entrer en mouvement, ce petit cliquet suffit pour entraîner le volant ; mais aussitôt que l'arrêt se fait, ce volant, en raison de sa vitesse acquise, fait céder ce léger obstacle et peut accomplir plusieurs tours sur lui-même avant que de s'arrêter, ce qui permet l'arrêt brusque

du mécanisme sans réaction nuisible de la part du volant.

Les détentes peuvent être placées, par rapport aux buttoirs d'arrêt des mobiles, dans telle position qu'il convient, soit dans le plan du mouvement de ceux-ci, soit dans un plan incliné ou perpendiculaire. Elles peuvent être mises en mouvement par l'inflexion de leviers plus ou moins multipliés, en rapport avec l'armature de l'électro-aimant qui commande, ou par la rotation d'une excentrique; enfin elles peuvent être combinées avec toutes les dispositions mécaniques possibles.

Nous avons vu précédemment que deux crochets d'encliquetage pouvaient servir de détente lorsqu'ils étaient soulevés en même temps et qu'ils abandonnaient ainsi à elle-même une roue à rochet ou une crémaillère. Nous avons également vu que le désengrènement de deux roues pouvait produire l'effet d'une détente. Dans ce dernier cas, l'un des trous dans lesquels pivote l'axe de la roue de détente doit être un peu allongé, et cet axe lui-même doit être maintenu à l'état normal dans sa position, par l'effet d'un ressort. Une tige adaptée à cet axe et à l'armature de l'électro-aimant, ou un levier coudé mis en mouvement par une tige articulée sur cette armature, commande alors le désengrènement et l'engrènement. Mais il faut pour cela, on le comprend aisément, que les dents des deux roues soient pointues.

Les détentes peuvent être appliquées, non-seulement aux mobiles animés d'un mouvement circulaire, mais encore à tous les organes mécaniques sollicités par une force quelconque; elles peuvent donc servir à brider une lame de ressort ou à soutenir à une hauteur voulue un corps plus ou moins pesant. Seulement, dans ces dernières applications, ces détentes doivent être combinées de telle manière que la force, qui est ainsi maintenue, ne tende pas à réagir sur l'armature qui les commande, ce qui est

facile en faisant que le mouvement de la détente s'effectue dans un plan perpendiculaire à celui du mouvement du mobile. Du reste, il faut toujours que la tension du ressort embridé ou le poids du mobile soit mis en rapport avec la force électrique qui doit réagir sur la détente.

C'est dans le jeu des détentes que l'emploi des répartiteurs électriques de MM. Froment et Robert Houdin est le plus utile, car c'est au moment où l'armature qui les commande est le plus éloignée de l'électro-aimant, que l'on a le plus besoin de force. Or, ces répartiteurs, comme nous l'avons vu, fournissent le moyen d'obtenir cet accroissement de force initiale.

Echappements. — Quand on veut régler électriquement, et par conséquent suivant les caprices de la volonté, le mouvement d'un mécanisme, ou bien quand on veut faire défiler un mouvement par périodes déterminées, il devient alors essentiel d'employer des intermédiaires au moyen desquels chaque mouvement accompli par l'armature commandant le mécanisme, ait pour premier effet de dégager le mouvement, et pour deuxième effet de l'arrêter. Ces intermédiaires sont donc de véritables échappements.

Les échappements employés dans l'horlogerie ont été combinés de mille manières différentes, et ont toujours été, depuis l'origine de cette industrie, l'objet d'études et de recherches persévérantes de la part des mécaniciens. Mais les échappements électro-magnétiques, n'ayant qu'à régler le mouvement d'un mécanisme sans avoir à transmettre une partie de ce mouvement à l'organe régulateur (le pendule), ne sont pas susceptibles d'un aussi grand nombre de combinaisons; aussi nous n'aurons guère à étudier que les échappements à ancre et les échappements à chevilles.

Les échappements à ancre consistent dans une fourchette ABCD, fig. 13, dont les branches BC, BD plus ou moins écartées, se terminent par des chevilles C et D ou des

becs M et N, fig. 17, entre lesquelles sont engagées les dents d'une roue à rochet O. Pour en comprendre le jeu, supposons que cette roue à rochet O, fig. 13, tourne dans le sens de D vers C, et que l'armature III de l'électro-aimant M n'étant pas attirée, ait permis au ressort antagoniste R d'incliner la fourchette de manière que la cheville D soit en prise avec la dent E du rochet. Le mouvement de cette roue sera alors arrêté, et la cheville C sera placée en dehors de la dent F. Mais aussitôt que l'armature sera attirée, la dent E se trouvera dégagée, et la cheville C, se rapprochant de la roue O, viendra se présenter devant la dent G, qu'elle arrêtera; la roue aura donc avancé d'une dent. Aussitôt que l'attraction magnétique aura cessé, le ressort antagoniste rappelant la fourchette dans sa première position, la cheville C laissera libre la dent G, qui s'échappera; mais alors la cheville D viendra butter contre la dent U qui se présentera. On voit donc que chaque attraction et chaque répulsion de l'armature auront pour effet de faire échapper une dent de la roue O, de telle sorte que cette roue tournera avec une vitesse qui pourra être appréciée mathématiquement, et qui dépendra du nombre de ses dents et du nombre de vibrations accomplies par l'armature.

Les échappements à chevilles fonctionnent exactement comme les échappements à ancre; seulement le mouvement de vibration de la fourchette s'exécute dans un plan perpendiculaire au plan de la roue, et celle-ci, au lieu d'avoir des dents, porte des chevilles. Il faut aussi que les branches de la fourchette ne soient pas dans le même plan, afin que quand l'une des chevilles butte contre une de ces branches, l'autre cheville soit libre de se dégager. L'inspection de la figure 14 suffit pour donner une idée de ce genre d'échappement.

Quel est le meilleur de ces deux systèmes d'échappement

pour les applications mécaniques de l'électricité ?.... C'est une question à laquelle on ne peut répondre d'une manière absolue. Si la force qui sollicite le mobile est considérable, l'échappement à chevilles est préférable, car avec l'autre, cette force pourrait entraîner la fourchette et la faire vibrer sans la participation de l'action électrique. Au contraire, si la force qui sollicite la roue est très-faible, et qu'on désire obtenir un très-grand nombre de vibrations, l'échappement à ancre doit être préféré, car les vibrations de la fourchette ne peuvent jamais surprendre les dents du rochet dans une position qui trouble la régularité de sa marche ; ce qui peut arriver quelquefois avec l'échappement à chevilles, comme nous allons le démontrer à l'instant. En effet, admettons que la dent F, fig. 13, n'ait pas complètement échappé quand la branche BC de la fourchette sera rappelée vers le centre de la roue O. La cheville C appuiera alors sur le plan incliné de la dent, et au lieu de troubler le mouvement de la roue il le facilitera. Avec l'échappement à chevilles, au contraire, il pourra se faire, si la fourchette n'a pas beaucoup de jeu en dehors des chevilles, ce que l'on doit rechercher pour diminuer la course de l'armature, il pourra se faire, dis-je, que les branches de cette fourchette viennent butter contre les chevilles. Ainsi, le choix des échappements dépend des conditions des instruments auxquels on les adapte.

Les échappements à chevilles peuvent être employés comme détentes lorsqu'on veut réagir sur une excentrique, une manivelle ou un mécanisme qui exige, pour opérer sa fonction, le tour complet d'une roue. Il suffit, pour cela, d'adapter à cette roue deux chevilles placées très-près l'une de l'autre, sur ses deux faces opposées. L'une de ces chevilles sert à arrêter le mouvement quand l'armature de l'électro-aimant est repoussée ; l'autre a pour fonction de limiter ce mouvement quand il est dégagé par

l'attraction de cette armature. Il en résulte que, quand l'électro-aimant est redevenu inerte, il se produit un petit mouvement pour que la première cheville se trouve de nouveau en prise avec la fourchette revenue en son point de repos. Ce petit mouvement, qui peut être nuisible dans certaines applications de ce système de détentes, est indispensable pour le bon fonctionnement des appareils, car l'attraction électrique est tellement prompte qu'une seule cheville, traversant de part en part la roue d'embrayage, ne pourrait suffire.

Si, avec ce dernier système d'échappement, on veut que les deux mouvements opposés de la fourchette opèrent deux dégagements égaux et successifs, il faut avoir recours à la disposition que j'ai représentée fig. 12. Cet échappement consiste dans une fourchette ABCD, dont les branches, très-courtes C et D, sont disposées au-dessus de la circonférence de la roue d'embrayage. L'une de ces branches C est taillée en biseau, comme on le voit fig. 12 bis, qui représente en plan cet échappement. La roue d'embrayage porte en un point de sa circonférence un buttoir d'acier E taillé également en biseau du côté où il se présente devant la branche C. Enfin cette dernière branche C est légèrement détournée de la ligne axiale CD, afin que, quand le buttoir E est arrêté par la branche D, le biseau de la branche C soit au-dessus du biseau du buttoir lui-même.

Le jeu de cet échappement est facile à expliquer : quand l'attraction électrique se manifeste, la branche C est attirée sur le buttoir E ; or, si celui-ci n'a pas eu le temps de s'échapper, le frottement des deux plans inclinés (de la branche et du buttoir) l'un sur l'autre provoque le dégagement de la roue au lieu de l'arrêter. Quand, au contraire, l'attraction a cessé, la petite différence d'alignement entre les deux branches de la fourchette suffit pour que le ressort

antagoniste ait rappelé à temps la branche D devant le buttoir E¹.

Les fourchettes des échappements à chevilles, au lieu de réagir sur des chevilles placées des deux côtés de la roue d'embrayage, peuvent être combinées de manière à réagir sur des chevilles placées d'un seul côté de cette roue, ce qui peut, dans certains cas, être très-avantageux.

La figure 15 représente ce genre d'échappement qui, du reste, est un des plus employés dans la grosse horlogerie. Voici comment il fonctionne. Quand la branche B de la fourchette est inclinée à droite, la cheville C qui sera, je suppose, en prise, se dégagera et permettra à la cheville D d'avancer; mais elle rencontrera bientôt la branche A contre laquelle elle viendra butter, et elle arrêtera le mouvement jusqu'à ce que la fourchette, étant inclinée à gauche, permette son dégagement. Alors elle se trouvera de nouveau arrêtée par la branche B, tandis qu'une nouvelle cheville se présentera en D. Une nouvelle inclinaison de la fourchette vers la droite provoquera un nouvel échappement, et ainsi de suite.

Doubles échappements. — Bien que les échappements électro-magnétiques appliqués à des mouvements d'horlogerie rendent les fonctions mécaniques de l'électricité beaucoup plus faciles, le frottement exercé par les chevilles ou les dents de rochet, sur les branches de la fourchette, ne laisse pas que d'opposer une certaine résistance. Pour diminuer cette résistance, M. Régnard a eu l'idée de combiner ensemble deux échappements fonctionnant solidairement l'un par l'autre. Les figures 18 et 19 représentent deux de ces nouveaux systèmes d'échappement.

L'ancre MN (fig. 18) engagée entre les dents du rochet R, oscille sur son axe C. Cet axe porte une longue tige L.

1. J'ai employé ce système d'échappement dans mon régulateur de chaleur.

terminée par une petite barre transversale mn qui a la forme d'un T renversé. XY est une seconde ancre très-petite, qui oscille sur son axe O , et dont les deux branches recourbées X et Y arrêtent l'extrémité des bras m et n , suivant qu'elle est inclinée à droite ou à gauche. Cette seconde ancre porte aussi une petite tige T terminée par une fourchette, dans laquelle se place l'extrémité d'un levier AB , fixé sur l'armature de l'électro-aimant, qui lui communique ainsi son mouvement d'oscillation.

Dans la position indiquée par la figure, le rochet R appuie sur le plan incliné M de l'ancre MN , et pousse vers la droite la tige L , dont l'extrémité m butte contre la partie X de l'ancre XY , de telle sorte que le système reste en repos dans cette position.

Lorsque le jeu de l'électro-aimant ramène la tige T vers la gauche, la branche X échappe l'extrémité m de la tige L ; cette tige est d'abord entraînée vers la droite par la pression que le rochet exerce sur le plan incliné M , puis elle est ramenée vers la gauche par la pression qu'il exerce sur le plan incliné N , sur lequel il retombe après avoir échappé; alors l'extrémité n vient butter contre la branche Y de l'ancre XY , avant que le rochet ait échappé le plan incliné N , et le système s'arrête dans cette nouvelle position.

Quand le jeu de l'électro-aimant ramène la tige T vers la droite, le double échappement se reproduit en sens inverse, et ainsi de suite indéfiniment.

Il est facile de comprendre que la pression exercée par le rochet R sur les plans inclinés de l'ancre MN est réduite en raison de la longueur du bras du levier L , lorsqu'elle se reproduit sur les parties X et Y de l'ancre XY ; et comme les surfaces de cette ancre, où appuie l'extrémité de la tige L , forment un arc de cercle dont le centre est en O , il n'y a plus là qu'un frottement presque insensible. La résis-

tance de ce frottement est encore réduite suivant la longueur du bras du levier T.

On peut remplacer l'ancre XY, par divers systèmes d'échappement disposés de l'extrémité de la tige de l'ancre MN à celle de la tige de l'armature de l'électro-aimant. Ainsi, on peut établir à l'extrémité de celle-ci deux dents de rochet placées en regard l'une de l'autre dans un sens inverse. L'extrémité de la tige de l'ancre MN échappe une de ces dents pour retomber sur l'autre.

Le système de double échappement que je viens de décrire convient essentiellement à la télégraphie électrique, à cause de la netteté avec laquelle il reproduit les mouvements les plus précipités. Voici un autre système qui peut agir avec des courants plus faibles encore ; mais comme il n'est pas susceptible d'autant de rapidité, il convient plus spécialement pour l'horlogerie électrique.

Les deux leviers LMN et L'M'N' (fig. 19) oscillent sur leurs axes C et C'. Les branches recourbées M et M' se terminent par une petite palette qui arrête les dents du rochet R ; les branches N et N' sont poussées par les dents de ce rochet, de manière à reporter vers la gauche les leviers L et L', lorsqu'ils se sont inclinés vers la droite sous l'action des petits ressorts r et r' . Les deux tiges L et L' sont alternativement soutenues par l'extrémité de la tige T adaptée sur l'axe du barreau aimanté AB. Cette dernière tige passe d'un levier à l'autre par une oscillation très-courte. Tandis qu'elle soutient le levier L, par exemple, le levier L' est soutenu par l'action des dents du rochet sur la branche N'.

Lorsque, dans la position indiquée par la figure, on envoie le courant positif qui attire le pôle A de l'aimant AB, la tige T quitte le levier L et passe sous le levier L'. Le levier L s'incline par l'action du petit ressort r , la dent x échappe et retombe sur la palette M'. Dans le même mou-

vement, la dent x'' quitte la branche N' qu'elle soutenait et pousse la branche N qu'elle soutient à son tour après avoir ainsi relevé le levier LMN . Lorsque le courant électrique étant rompu, le barreau AB reprend sa position première, la tige T quitte le levier L' et repasse sous le levier L . Le levier L' s'incline à son tour, la palette M' échappe la dent x , et la dent x' vient butter contre la palette M . Dans le même mouvement, la dent x''' relève le levier L' en poussant la branche N' .

Dans ce système, l'échappement des dents du rochet s'opère par l'action des ressorts r et r' , et le retour des deux leviers L et L' s'opère par l'action du rochet sur les branches N et N' , de telle sorte que la tige T ne fait que soutenir et laisser tomber l'extrémité du levier qui peut être très-long, et par conséquent presque sans pression. Comme les oscillations de la tige T sont très-courtes, on peut faire agir l'électro-aimant à une très-petite distance de son armature, et employer ainsi le maximum de l'attraction magnétique.

Echappements à encliquetages. Ces sortes d'échappements n'ont rien de particulier dans leur application aux appareils électriques. Mais comme ils jouent un très-grand rôle dans ces appareils, nous croyons utile d'exposer brièvement les différentes dispositions qu'on leur a données.

Une roue à rochet O , fig. 20, sur laquelle réagit un crochet d'encliquetage AB , sollicité par un mouvement alternatif de va-et-vient, peut tourner de l'intervalle d'une dent successivement à chacun des mouvements dont ce crochet est animé, si, pendant le temps que s'accomplit le mouvement rétrograde de celui-ci, une force quelconque retient la roue. Cette force quelconque peut être une pression suffisamment forte exercée sur la surface de cette roue ou l'intervention d'un second crochet d'encliquetage CD . Ces deux systèmes de crochets AB , CD constituent ce

que l'on appelle des *cliquets*. Le premier, AB, est désigné sous le nom de *cliquet d'impulsion*, le second, CD, sous celui de *cliquet de retien ou de repos*.

Pour que les cliquets d'impulsion et de repos exercent sûrement leurs fonctions, il faut qu'ils soient sollicités vers le centre du mobile par une force quelconque très-légère. Cette force peut être fournie, soit par des ressorts RS, FE, soit par le poids des cliquets; quelquefois même on peut construire les cliquets eux-mêmes avec des lames de ressort, comme on le voit fig. 21. Dans tous les cas, on doit limiter l'action de cette force par des buttoirs d'arrêt M, afin d'empêcher ces cliquets de trop s'enfoncer entre les dents du rochet, ce qui occasionnerait des frottements inutiles.

Dans les deux figures 20 et 21, les cliquets d'impulsion réagissent dans un sens contraire : l'un en attirant les dents du rochet par un crochet A, l'autre en poussant ces dents par un bec T. Mais il peut arriver qu'on soit forcé de les faire réagir dans un sens normal au mouvement qui les sollicite. Alors on peut employer les cliquets articulés représentés fig. 22. Ces cliquets sont très-sûrs dans leur manière de fonctionner.

Les échappements à encliquetage que nous venons de passer en revue ne sont susceptibles d'être employés que quand le mobile qui agit sur eux est animé d'un mouvement de va-et-vient. Quand ce mobile est animé d'un mouvement circulaire, c'est-à-dire, quand une roue doit, à chaque révolution ou plusieurs fois par révolution, faire sauter d'une quantité voulue une seconde roue, le problème devient plus complexe, et on est obligé d'employer ce que l'on appelle les *doigts*, les *sautoirs*, et les *étoiles*.

Les échappements de ce genre peuvent être adaptés à des roues à chevilles, à des roues à dents de rochet ou à des roues à dents droites. Le plus simple est celui qui s'a-

dapte à la roue à chevilles et qui est représenté fig. 23. Il se compose : 1° d'une roue O, portant autant de chevilles qu'elle doit recevoir d'impulsions par chaque révolution de la roue qui la commande; 2° d'une étoile ou triangle métallique AB, fixé à l'extrémité d'une lame de ressort AR; 3° d'un buttoir ou *doigt* CD fixé en un point quelconque de la roue motrice et dépassant la circonférence de cette roue de manière à rencontrer les chevilles de la roue O. La longueur de ce doigt est calculée de manière que l'arc de la circonférence O, coupé par l'arc EF qu'il décrit, représente précisément l'arc correspondant à l'intervalle de deux chevilles consécutives. Il en résulte que quand ce doigt a accompli toute sa course, il a fait sauter une des chevilles d'une quantité suffisante pour réagir, à sa prochaine révolution, sur la cheville immédiatement en arrière. Or, c'est pour assurer la position de la roue O après l'échappement de chaque cheville, que l'étoile AB a été adaptée à cette roue. Elle joue, comme on le voit, le rôle du cliquet de repos dans le système d'échappement précédent.

Comme c'est par la légère pression et le frottement exercé par ses deux plans inclinés sur deux chevilles consécutives de la roue O que l'étoile opère l'arrêt de cette roue, on comprend aisément que ce système d'embrayage peut être adopté pour toutes les roues dont les dents pointues, rondes ou droites présentent entre elles un intervalle assez large pour l'introduction d'une étoile. Ce système offre d'immenses ressources en mécanique. Du reste, l'étoile peut être remplacée par une lame de ressort infléchie en un point de sa longueur, par un galet à bascule, comme on le voit fig. 24, enfin par toutes pièces susceptibles d'être soulevées facilement et d'être introduites entre les dents ou les chevilles du mobile.

L'échappement à sautoir susceptible de s'adapter aux roues à dents droites est un peu plus compliqué. Il se com-

pose d'un doigt AB, fig. 25, soudé sous une rondelle métallique et d'un cliquet de retien EF, muni d'un buttoir P assez délié pour être introduit entre deux dents de la roue à échapper. Ce cliquet de retien qu'on voit en élévation dans la fig. 25 *bis* est terminé par un bec F, que peut soulever en temps convenable un buttoir C fixé sur la rondelle AB. Ce buttoir commence à réagir sur le cliquet EF un peu avant que le doigt AB soit approché de la dent qu'il doit faire échapper. Il en résulte que le soulèvement du cliquet de repos est suivi immédiatement de l'échappement de la dent, et qu'aussitôt que cette dent est échappée, le cliquet, abandonné à lui-même, reporte le buttoir P dans un intervalle de dents.

Les doigts destinés à réagir sur les roues d'échappement à dents rondes ou pointues sont ordinairement constitués par des chevilles plus ou moins fortes; mais il faut que les intervalles entre les dents de ces roues soient assez larges pour correspondre à l'arc décrit par ces chevilles. Quand avec ce système on veut préparer le désencliquetage, comme dans le système précédent, il devient alors nécessaire d'adapter au cliquet de repos AB, fig. 26 (qui porte alors une cheville A contre laquelle la roue d'échappement O à dents rondes vient butter), une oreille CDE en forme de socle de charrue. La cheville motrice M, en passant sous cette oreille en plan incliné, la soulève et désencliquette la roue avant que l'échappement ne soit effectué. Immédiatement après que celui-ci a eu lieu, la cheville se trouve dégagée de dessous l'oreille par l'échancrure E, et le cliquet retombe pour embrayer de nouveau la roue d'échappement. Il faut, par exemple, une étoile pour maintenir cette roue au moment du soulèvement du cliquet de repos.

Il arrive quelquefois que l'action produite sur un encliquetage a pour effet secondaire de mettre en mouvement

des pièces formant volant et dont la vitesse acquise pourrait faire céder le cliquet de retien. Pour assurer, dans ce cas, l'échappement, il faut avoir recours à un encliquetage supplémentaire adapté aux pièces mêmes qui forment le volant.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de faire marcher un rochet de petit diamètre O, fig. 27, sur l'axe duquel est monté un grand disque OX, sous l'influence d'un cliquet conduit par l'armature AC d'un électro-aimant. Évidemment l'encliquetage du rochet O ne pourrait résister à l'impulsion communiquée au disque OX. Pour obtenir de la régularité dans le jeu de cet échappement, il sera donc nécessaire d'adapter au disque OX un système particulier d'encliquetage. Ce système consistera à munir le disque OX d'autant de chevilles que le rochet O a de dents, et à adapter à l'armature de l'électro-aimant une équerre AD munie d'une broche D perpendiculaire au plan du disque. Quand l'armature sera en son point de repos, cette broche se trouvera exactement au-dessus de l'une ou de l'autre des chevilles du disque ; mais aussitôt que l'attraction électrique s'exercera, le rochet sera entraîné et, par suite, le disque en tournant fera échapper la cheville placée immédiatement sous la broche D ; mais cette broche en même temps s'abaissera, et lorsque la dent du rochet sera entièrement échappée, la cheville du disque immédiatement en arrière de celle qui a échappé viendra butter contre la broche, qui amortira le coup et permettra alors à une étoile EF d'exercer une action efficace. Ce système d'encliquetage pourra donc servir en même temps de cliquet de retien au rochet O¹.

Transformateurs de mouvement. La mécanique offre de nombreux moyens de transformer les mouvements ;

1. Ce système d'encliquetage a été employé par moi dans un compteur électro-chronométrique.

mais parmi tous ces moyens, nous ne considérerons que ceux qui sont susceptibles d'être employés dans les applications de l'électricité, c'est-à-dire ceux qui ont pour organes mécaniques la roue à rochet et la manivelle.

Nous avons déjà vu précédemment au sujet des échappements par encliquetage, comment le mouvement de va-et-vient d'une armature d'électro-aimant pouvait être transformé en mouvement circulaire par l'action d'un cliquet d'impulsion sur une roue à rochet; mais ce moyen de faire réagir la roue à rochet n'est pas le seul, et avec les fourchettes d'échappement elles-mêmes on peut obtenir ce résultat.

Supposons, en effet, que la roue à rochet de la fig. 17 au lieu d'être sollicitée par un moteur, soit inerte au moment du fonctionnement de la fourchette; la dent E sera en prise avec la branche D de la fourchette, qui remplira alors les fonctions d'une étoile; mais la branche C sera au-dessus du revers incliné de la dent F. Quand l'armature sera attirée, la dent F se trouvera donc dégagée, et le bec C, appuyant sur le plan incliné de la dent F, la poussera jusqu'à ce qu'elle soit complètement échappée. Aussitôt que l'armature sera repoussée, le même effort sera exercé sur la dent E; de telle sorte que, pour une vibration un peu rapide de la fourchette, la roue à rochet tournera comme si elle était sollicitée par un mouvement d'horlogerie.

Avec les échappements à chevilles le même effet peut être obtenu; mais il faut que les branches de la fourchette soient taillées en biseau ainsi que les chevilles de la roue d'échappement, et que ces branches soient assez minces ou assez larges pour que, étant introduites entre deux chevilles consécutives, la roue se trouve maintenue sans trop de ballotement. La figure 16 représente cette disposition.

Voici alors ce qui arrive quand un pareil système entre en fonction.

Au moment de l'attraction de l'armature, la cheville C, qui se trouve buttée contre la branche B de la fourchette devient libre, mais la branche A rencontre alors le plan incliné de la cheville D, et les deux biseaux, en glissant l'un sur l'autre, font avancer la roue d'échappement jusqu'à ce que la cheville E soit arrivée en D et, par suite, que la cheville F soit arrivée en C. Alors la branche B se trouve placée, à l'égard de la cheville F, dans la même position qu'était la branche A par rapport à la cheville D. Il en résulte donc qu'au moment de la répulsion de l'armature, un nouvel échappement doit s'effectuer.

Quand la force électrique dont on dispose est énergique, et que la longueur du circuit dans lequel est interposé l'électro-aimant qui commande le mécanisme est très-petite, les transformateurs de mouvement que nous venons de décrire peuvent être employés de préférence aux échappements, parce qu'ils sont beaucoup plus simples et beaucoup plus économiques. Mais quand il s'agit de faire marcher des appareils à distance avec les courants d'une pile de Daniell, ou bien quand il s'agit de mettre en mouvement un mobile qui exige une certaine force, les échappements deviennent indispensables. C'est alors l'horlogerie qui fait tous les frais du mouvement, et l'électricité n'intervient que comme régulateur; ce qui exige de sa part une action infiniment moins énergique. Ces considérations doivent entrer en première ligne dans les combinaisons que l'on peut faire pour réaliser telle application électrique que l'on aura en vue.

Pour obtenir la conversion du mouvement alternatif résultant de l'attraction magnétique en mouvement circulaire par l'intermédiaire d'une manivelle, on est obligé

d'amplifier considérablement la course de l'armature de l'électro-aimant par des combinaisons plus ou moins compliquées de leviers. Aussi ce système de transformateur n'est-il guère susceptible d'application que pour les électromoteurs dont nous parlerons dans le prochain volume. Mais s'il en est ainsi pour la conversion du mouvement électro-magnétique en mouvement circulaire, il n'en est plus de même pour la conversion du mouvement circulaire en mouvement alternatif, et, dans ce cas, les manivelles et les excentriques sont d'un secours immense. Nous en verrons plus d'une fois l'application dans les appareils électromagnétiques que nous aurons à décrire.

La conversion du mouvement circulaire en mouvement alternatif peut être obtenue d'une foule de manières différentes : soit par la rencontre des dents d'une roue à cames avec l'extrémité d'un levier articulé et sollicité par un ressort, soit par les fourchettes d'échappement dont nous avons parlé précédemment, soit par des limaçons, comme dans la figure 9, soit par des buttoirs ou palettes fixés sur l'axe du mobile, etc., etc. Tous ces moyens se devinent aisément, et je ne m'arrêterai pas à les décrire. Je préfère consacrer la fin de ce chapitre à la description d'appareils électro-mécaniques qui peuvent être d'un grand secours dans la plupart des applications mécaniques de l'électricité.

RÉGULATEURS DES COURANTS.

Les courants électriques sont, comme on le sait, très-variables dans leur intensité et dans leur tension, surtout ceux qui proviennent des piles à acides. Or, il importe, dans beaucoup d'expériences et même dans certaines applications du fluide électrique, comme l'éclairage électrique, d'avoir une source d'électricité constante. Plusieurs physiiciens se sont efforcés de résoudre ce problème ; mais c'est

M. Wartmann, de Genève, qui, jusqu'à présent, a le mieux réussi.

Régulateur de M. Jaxton. Depuis longtemps M. Foucault avait proposé, pour la régularisation de forts courants, d'interposer au milieu d'eux une forte résistance, susceptible d'être diminuée à volonté. M. Jaxton, en Amérique, réalisa, quelque temps après, cette idée, en accompagnant son régulateur de lumière électrique d'un petit appareil qu'il appela *gouverneur des courants*, et qui avait pour objet de renforcer le courant à mesure qu'il s'affaiblissait. Cet appareil se composait d'une cuve en verre remplie d'eau légèrement acidulée, et munie latéralement de deux garnitures en cuivre AB, CD (fig. 1, pl. VII), à travers l'une desquelles passait une longue tige à vis de rappel GH. Cette vis se terminait par un grand disque métallique G plongeant dans le liquide, et les deux garnitures étaient mises en rapport avec le courant par deux boutons d'attache C et D fixés sur elles.

Au commencement de l'expérience, quand le courant électrique était à son maximum, on rapprochait de la garniture C la tige GH, jusqu'à ce que le courant transmis au régulateur eût acquis une intensité suffisante pour donner à la lumière l'éclat qu'on désirait en obtenir; après quoi on abandonnait l'appareil à lui-même. Quand le courant venait à s'affaiblir, on rapprochait encore l'une de l'autre les deux pièces métalliques, et l'on pouvait renouveler cette opération jusqu'à ce que le circuit fût complété par le contact de ces pièces.

Régulateur de M. Wartmann. L'inconvénient immense de l'appareil précédent était d'exiger continuellement l'attention et la présence de l'expérimentateur; c'est pour y remédier que M. Wartmann a eu l'idée de construire son régulateur des courants.

Cet appareil est disposé pour régler des courants de

faible intensité, aussi bien que des courants très-énergiques. En conséquence, il emploie comme graduateur des résistances, tantôt les liquides, tantôt les bobines du rhéostat de M. Wheatstone. L'instrument se compose : 1° d'un électro-aimant tubulaire A (fig. 2, pl. VII), entouré d'une chemise de fer doux attenante à l'un de ses pôles, pour en augmenter la puissance; 2° d'un mouvement d'horlogerie à ailettes M, embridé à l'état ordinaire par une détente commandée par l'armature B de l'électro-aimant; 3° de deux systèmes de transmission de mouvement D et I, ayant pour effet de réagir à volonté sur l'un ou l'autre des deux graduateurs des résistances, de manière à rapprocher successivement les deux plaques métalliques du graduateur liquide, ou à faire défiler les bobines du rhéostat; 4° d'un système de commutateur à l'aide duquel quatre ou cinq fils, qui sont enroulés à la fois sur l'électro-aimant, peuvent être réunis en quantité ou en tension.

L'armature B est vissée dans la tige GH; elle peut par conséquent être plus ou moins reculée de l'électro-aimant et subir plus ou moins l'effet de sa force attractive, ce qui est nécessaire pour rendre le ressort antagoniste R susceptible de réagir, quand le courant est très-énergique. A cet effet, une petite vis de rappel T est adaptée à cette armature, et empêche l'attraction de s'effectuer complètement.

Le jeu de cet appareil est très-simple : quand le courant qui passe à travers l'électro-aimant et les graduateurs est assez affaibli pour que l'armature cède à l'effort du ressort antagoniste, le levier GH abaisse la détente C et dégage le mouvement d'horlogerie M. Celui-ci rapproche alors les plaques métalliques du graduateur liquide, ou déroule le fil du rhéostat, suivant que c'est la roue D ou la roue I qui est engrenée, jusqu'à ce que le courant ait acquis suffisamment d'énergie pour rendre l'électro-aimant susceptible

d'attirer de nouveau l'armature B, et, par suite, pour embrayer le rochet R.

La figure 2 (pl. VII) ne représente que le principe de construction du régulateur de M. Wärtmann. Dans le prochain volume, cet appareil sera reproduit dans tous ses détails.

Régulateur de M. X... A l'exposition universelle de 1855, un inventeur dont j'ai oublié le nom avait exposé un régulateur de courants dont le principe était assez ingénieux, mais qui ne pouvait s'appliquer qu'à de forts courants. Il consistait dans un vase hermétiquement fermé et rempli d'eau légèrement acidulée, dans laquelle plongeaient deux lames de platine en rapport avec les deux pôles de la pile. Ces deux lames étaient fixées à un couvercle isolant disposé comme le piston de la pompe des prêtres, c'est-à-dire enclavé dans une espèce de calotte de caoutchouc fortement ficelée sur le vase. Un tuyau de décharge permettait aux gaz de s'échapper, mais dans une proportion constante et susceptible d'être réglée. Quand le courant qui traversait le liquide, par l'intermédiaire des électrodes de platine, était trop fort, la quantité des gaz dégagés dans un temps donné était plus considérable que ne le comportait l'orifice d'écoulement, et le couvercle du vase se trouvait soulevé, mais celui-ci en s'élevant entraînait les plaques de platine, et leur surface immergée étant diminuée, la transmission du courant devenait plus difficile. La quantité de gaz produit devenait alors moindre, et le couvercle s'abaissait, motivant par là une cause de renforcement de courant. De cette manière, la force du courant électrique se trouvait toujours maintenue à un même degré d'énergie, que l'on pouvait du reste faire varier en modifiant les conditions d'ouverture du tuyau d'écoulement.

Il y avait dans cet appareil plusieurs accessoires dont je ne me suis pas rendu parfaitement compte, mais qui, je

crois, étaient destinés à réagir sur le tuyau d'écoulement, ou pour mettre l'appareil en rapport avec différentes intensités de courant. Nous reviendrons plus tard sur cet ingénieux appareil, si l'auteur m'envoie des renseignements suffisants.

Régulateur de M. Froment. Pour régler l'intensité des courants réagissant sur ses moteurs électro-magnétiques, M. Froment a employé un système de régulateur à force centrifuge, analogue à celui dont on se sert dans les machines à vapeur pour modérer ou augmenter la quantité de vapeur transmise au cylindre du piston.

Ce régulateur, représenté fig. 3, se compose d'un axe vertical AX, à la partie supérieure duquel sont articulées deux tiges AB, BC terminées par des boules de plomb B et C. Sur ces tiges sont articulées d'autres tiges DF, EF, reliées à un collier cylindrique F mobile sur l'arbre AX. Enfin, un levier à fourchette FG, basculant en H et saisissant le collier F par une gorge IJ, dans laquelle sont engagées les branches de la fourchette, permet de transmettre, par l'intermédiaire d'une poulie M, les mouvements opérés par le collier F au charbon d'une pile supplémentaire P.

Quand le courant est très-énergique, l'axe AX, qui est relié au moteur par la poulie X, se trouve animé d'une grande vitesse de rotation, et, en raison de l'accroissement de la force centrifuge, les boules B et C s'écartent considérablement de cet axe. Le collier F se trouve en conséquence soulevé, et le levier IG, en s'inclinant, soulève à son tour le charbon K de la pile supplémentaire; le courant de cette pile ne s'ajoutant plus à celui de la pile appelée à faire marcher le moteur en diminue l'intensité. Alors le mouvement se ralentit, et les boules B et C, en se rapprochant de l'axe AX, font plonger davantage le charbon K dans la pile, ce qui provoque un renforcement du cou-

rant. Si le poids des boules B et C est convenablement calculé, ainsi que la course du collier F, par rapport à la hauteur d'immersion du charbon K, la régularisation s'effectue d'une manière permanente et sans mouvements brusques.

Pile plongeante de M. Robert Houdin. — Dans beaucoup d'applications de l'électricité, il est certaines fonctions mécaniques qui nécessitent, dans un moment donné, une force électrique beaucoup plus considérable que celle qui est fournie par les piles à faibles courants que l'on emploie ordinairement. Dans ces cas, on ne peut substituer à ces faibles courants des piles à acides, car outre la dépense considérable d'entretien que ces dernières entraîneraient, elles ne présenteraient pas une régularité d'action assez grande pour le jeu des appareils, et exigeraient pour leur entretien un soin beaucoup trop assujettissant. D'ailleurs, dans la plupart des cas dont nous parlons, cette grande force électrique n'est nécessaire que momentanément, et à des intervalles plus ou moins éloignés. En employant donc, comme pile ordinaire, une pile à acides toujours chargée, on ferait une dépense en pure perte. Dans le but d'éviter cette dépense, M. Robert Houdin s'est imaginé de combiner un mécanisme, au moyen duquel une pile de Smée, aussi puissante qu'on peut le désirer, pourrait se charger elle-même en temps opportun, et se décharger également elle-même, après que la fonction mécanique qu'elle aurait été appelée à produire se serait effectuée. Ce mécanisme, que M. Robert Houdin a appliqué à la marche de fortes sonneries d'horloges électriques, est représenté fig. 5. Il se compose de deux appareils : l'un, un simple interrupteur de courant, est en correspondance avec le mécanisme qui doit provoquer l'action électrique énergique, par exemple avec la roue de compte de la pendule régulatrice, dans l'application qu'en a faite M. Robert

Houdin; le second, l'appareil régulateur, est destiné à effectuer la décharge de la pile.

Ce second appareil consiste essentiellement dans une grande bascule AB, à l'un des bras de laquelle se trouve attachée, par l'intermédiaire d'une corde, une traverse de bois CD, munie de plaques métalliques des différents éléments de la pile de Smée. Cette traverse est mobile dans deux coulisses CE, DF, qui font partie de la caisse de la pile, et peut, étant abaissée suffisamment, faire plonger toutes les lames métalliques des éléments de la pile dans leurs auges respectives remplies d'eau acidulée. En ce moment, la pile est chargée; mais quand, par l'intermédiaire de la bascule, la traverse est soulevée, la pile se trouve déchargée. Pour obtenir mécaniquement et sous une influence minime ce double effet, un limaçon L, dont le plus grand diamètre correspond à la course que doivent accomplir les plaques pour être immergées, a été adapté au-dessous du bras AO du levier AB. Ce limaçon est mis en mouvement par un contre-poids P, mais il est commandé par deux longues ailettes IH et IJ qui, tout en tempérant la vitesse de la chute de la bascule, servent en même temps de détente. Ces ailettes, en effet, sollicitées à tourner sur elles-mêmes par le buttoir K porté par le limaçon, se trouvent engagées alternativement entre deux buttoirs H et N portés par l'armature d'un électro-aimant. Quand cet électro-aimant est inerte, l'une des ailettes est bridée contre la tête H de son armature; alors le limaçon est maintenu au point le plus élevé de sa course, et par suite la pile reste soulevée. Quand, au contraire, l'électro-aimant devient actif, l'ailette IH est débridée, le mouvement du limaçon s'opère, et la cheville Q du levier AB, contre laquelle frotte la spirale du limaçon, tombe dans la coche QR. Les lames métalliques de la pile plongent dans leurs auges respectives, et cette immersion est assurée par

le buttoir N, qui arrête l'aillette IH aussitôt qu'elle a été débridée. Tant qu'un courant électrique circule à travers l'électro-aimant, la pile demeure chargée; mais aussitôt que ce courant est interrompu, le buttoir N en s'écartant débri-de de nouveau l'aillette IH, et le limaçon, en accomplissant sa révolution, soulève successivement la cheville Q jusqu'à ce que le buttoir K, qui s'est alors dégagé de l'aillette IH, soit retombé sur l'aillette IJ, placée en ce moment dans une position voisine de IH. Alors l'arrêt complet du limaçon se trouve effectué par le buttoir H, et la pile demeure complètement déchargée, jusqu'à ce qu'une nouvelle fermeture de courant réagissant sur l'électro-aimant M ait motivé un nouveau dégagement du limaçon.

C'est pour soulager l'action du limaçon et diminuer le poids P qu'on a adapté au levier AB le contre-poids S, qui équilibre la pièce CD chargée de ses lames métalliques.

D'après cette description, il est facile de comprendre que, pour obtenir dans un temps donné la charge ou la décharge de la pile à acides, il suffit de lancer en ce moment-là, à travers l'électro-aimant M, le courant d'une pile de Daniell; ce qui peut être fait par l'appareil transmetteur lui-même, à l'aide d'un interrupteur ou d'un rhéotomé.

Dans l'application que M. Robert Houdin a faite de cet instrument, c'est le mouvement de la sonnerie de son horloge régulatrice qui met l'appareil en action. Seulement, comme le temps de la charge de la pile de Smée peut être plus ou moins long pour correspondre aux différentes heures qui doivent être sonnées, un rhéotome spécial a dû lui être adapté. Voici en quoi il consiste : A, fig. 5 bis, est la roue de compte de la pendule régulatrice, M le marteau de la sonnerie, et R la détente du mouvement de la sonnerie. Deux lames de cuivre BC, DE isolées sur une plaque d'ivoire sont disposées parallèlement l'une devant l'autre, de manière à ce que l'une d'elles BC, étant rencontrée par

l'ergot en ivoire H, porté par l'axe du marteau M, se trouve poussée contre l'autre et établit alors un contact métallique réagissant sur l'électro-aimant M. Si cette disposition eût existé seule, il en serait résulté que chaque coup frappé par le marteau M aurait eu pour effet la charge et la décharge de la pile à acides. Or, cette double fonction n'aurait pas eu le temps de s'accomplir pendant l'intervalle si court qui sépare les coups du marteau dans les sonneries; il fallait donc un système rhéotomique qui pût prolonger la fermeture du courant tout le temps employé par le marteau M à frapper sur le timbre. Pour cela, M. Robert Houdin a adapté au ressort BC une prolongation métallique GK en forme de crochet, et a muni l'axe S du levier SQ, portant la détente R d'un second levier d'ivoire LS, terminé par une cheville L. Il résulte de cette disposition que, quand le levier SQ étant soulevé reporte la détente R sur la came de la roue de compte, le levier SL est incliné vers la droite, tandis que le crochet CGK, poussé vers la gauche par l'ergot H du marteau, vient s'accrocher sur la cheville L. Il arrive par conséquent que, quand le marteau retombe à chaque coup qu'il frappe, le ressort BC est maintenu appuyé contre le ressort DE, et continue la fermeture du courant à travers l'électro-aimant M (fig. 5). Ce n'est que quand la détente R fig. 5 *bis* retombe dans une coche de la roue de compte que la cheville L dégage le crochet CGK, et provoque la rupture du circuit allant à l'appareil de la fig. 5.

Comme à chaque fermeture de courant opérée à travers l'électro-aimant M fig. 5 le poids P descend d'une longueur égale au développement de la circonférence de la poulie UG, il arriverait que, pour une faible hauteur d'appartement, l'appareil réagissant sur la pile à acides serait bien vite arrêté. Pour éviter cet inconvénient, M. Robert Houdin s'est imaginé d'en faire opérer le remontage par l'ouverture d'une porte. A cet effet, il adapte le poids P à une

poulie Z mobile sur une corde repliée en LZYXL, autour de trois poulies Y, UG, X, et dont l'extrémité, après s'être enroulée en Y, va s'attacher à la partie supérieure du battant de la porte en question. Chaque ouverture de cette porte ayant pour effet la traction du poids P et le défilement de la poulie X à laquelle est attaché un petit contre-poids; l'appareil se trouve ainsi successivement remonté.

VII.

MACHINES D'INDUCTION.

Le dégagement électrique fourni par la pile n'est pas la seule source d'électricité qu'on puisse utiliser dans les applications physiques et mécaniques de l'électricité. Les courants d'induction qui naissent, comme nous l'avons déjà vu, de la réaction des aimants sur des hélices métalliques ou des réactions statiques de l'électricité voltaïque, peuvent, dans certains cas, être employés avec de grands avantages. Les appareils au moyen desquels ces courants sont produits d'une manière continue, devront donc figurer dans cette première partie de mon ouvrage, aux mêmes titres que les différentes piles que nous avons précédemment décrites, et ce sera sous ce point de vue que nous les étudierons dans ce chapitre. Nous en ferons ressortir plus tard les différentes applications, principalement celle qui en a été faite à la médecine.

Les appareils d'induction peuvent, comme nous l'avons vu dans notre premier livre, être fondés sur l'induction des courants voltaïques disposés de manière à constituer des aimants dynamiques, ou sur l'induction des aimants persistants eux-mêmes. Mais dans l'un et l'autre cas, il est essentiel que le courant inducteur (le courant magnétique dans l'aimant persistant et le courant voltaïque dans l'ai-

mant dynamique) soit interrompu à des intervalles très-rapprochés.

Pour obtenir des instruments capables de fournir des courants d'induction d'une manière continue, il fallait donc trouver le moyen de suspendre, par une action mécanique, le courant magnétique dans les aimants persistants ou le courant voltaïque dans les aimants dynamiques. On a résolu le problème de diverses manières, et les machines qu'on a construites dans ce but peuvent se diviser en quatre classes très-distinctes : 1° les appareils magnéto-électriques fondés sur l'aimantation temporaire du fer doux ; 2° les appareils magnéto-électriques fondés sur la suspension du courant magnétique par une réaction statique ; 3° les appareils magnéto-électriques où les deux genres de réactions précédentes sont réunis ; 4° les appareils d'induction voltaïque. L'avantage de ces derniers est de pouvoir être mis en mouvement par eux-mêmes sans l'intervention de personne ; l'avantage des premiers est d'être plus portatifs.

MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES

FONDÉES SUR L'AIMANTATION TEMPORAIRE DU FER DOUX.

M. Pixii, constructeur français, paraît être le premier qui ait construit les machines d'induction rotatives. Dès l'année 1832, en effet, un appareil de ce genre avait été exposé par lui à la Sorbonne pour le cours de M. Ampère ; mais les dimensions énormes de cette machine, sa disposition encombrante et son prix considérable en faisaient un instrument d'un usage impraticable dans la plupart des expériences auxquelles on aurait pu l'appliquer. En 1833, l'Américain Jaxton, après plusieurs essais tentés dans le courant de l'année 1832, imagina une disposition beaucoup plus simple, qui lui permit de réduire considérablement le volume de l'appareil. C'est cette disposition qui a été adop-

tée dans les machines vulgairement désignées sous le nom de *machines de Clarke*, bien que M. Clarke n'en ait jamais été l'inventeur.

Machine magnéto-électrique de Jaxton. La machine de Jaxton consistait dans un aimant fixe en fer à cheval NS, fig. 4, Pl. VII, devant les pôles duquel pouvait tourner sur un axe horizontal NN' un électro-aimant de fer doux DD'. Cet axe était mis en mouvement par une petite poulie liée à une roue verticale EE' de grand diamètre, sur laquelle était fixée la manivelle K que l'on devait tourner.

Eu égard à sa fonction, l'électro-aimant mobile jouait le rôle d'une armature; il devenait, par conséquent, un aimant en s'approchant des pôles de l'aimant fixe; mais en s'en écartant il perdait son magnétisme.

Les conditions d'interruption du courant magnétique étaient donc satisfaites par l'effet de cette rotation, et un double courant devait naître dans chaque bobine pour chaque demi-tour accompli. Pourtant, après des expériences répétées, M. Jaxton put se convaincre que la disposition ordinaire des bobines sur le fer des électro-aimants n'était pas la disposition la plus favorable pour obtenir, de la part de ces bobines le maximum d'effet dont elles étaient susceptibles, et qu'il fallait, au contraire, les enrouler en sens inverse l'une de l'autre. De cette manière, il est vrai, les deux courants créés dans chaque bobine se trouvent marcher en sens inverse l'un de l'autre dans les conducteurs qui réunissent ensemble les extrémités correspondantes des deux hélices; mais si on fait partir de ces conducteurs de jonction les deux rhéophores du circuit, les deux hélices agissant *séparément* et d'une manière opposée, envoient toujours dans chacun de ces rhéophores une même électricité pour chaque manifestation électrique qui s'y développe.

Pour fixer les idées sur cette question, qui du reste est

assez complexe et qui n'est expliquée dans aucun traité de physique, supposons que les deux bobines de l'électro-aimant soient représentées par les spirales M et M' contournées, comme on le voit; fig. 6, en sens inverse l'une de l'autre. Les noyaux A et B représenteront les branches de fer de l'électro-aimant, et les rectangles N et S seront les pôles nord et sud de l'aimant persistant, en fer à cheval, devant lequel l'électro-aimant tournera. Quand cet électro-aimant s'éloignera des pôles N et S, comme le représente la figure, le mouvement de rotation s'opérant de N vers S, un double courant sera créé dans les deux spirales, l'un par la désaimantation de la branche B, qui sera pôle sud, l'autre par la désaimantation de la branche A, qui sera pôle nord. Ces deux courants seraient dirigés en sens contraire l'un de l'autre si les deux spirales étaient dans les mêmes conditions; mais comme elles sont enroulées en sens contraire, les courants qui les sillonneront présenteront le même pôle aux extrémités homologues, c'est-à-dire que si D est pôle positif pour la spirale M', C sera également pôle positif pour la spirale M. Par rapport au circuit ITK, greffé en I et K sur les fils CD, EG, qui réunissent les extrémités des deux spirales, le courant résultant ira de I en K, comme si deux éléments de piles, réunis par leurs pôles semblables ou disposés en quantité, étaient en rapport avec ce circuit. Nous verrons bientôt que cette disposition a permis la simplification du commutateur des machines magnéto-électriques.

Pour recueillir le courant ainsi créé dans les bobines d'induction, voici comment M. Jaxton avait disposé son appareil : la broche ou arbre porteur de l'électro-aimant, au lieu de se terminer à la traverse unissant les deux branches de cet électro-aimant, se prolongeait au delà et se terminait par une double aiguille métallique *b*, fig. 4 et 4 bis, fixée normalement à son axe dans une position con-

venable en rapport avec celle de l'armature. A côté de cette aiguille était adapté, à l'arbre lui-même, un manchon d'ivoire O portant un disque de cuivre C, auquel aboutissaient les extrémités *extérieures* des fils des deux bobines. Les deux autres bouts étaient soudés sur les branches mêmes de l'électro-aimant, de sorte que l'arbre N'N' et le disque C jouaient, par rapport aux bobines induites, le rôle des conducteurs TI, T'K de la figure 6. Par suite, l'aiguille *b* et le disque C pouvaient représenter les deux pôles de l'appareil.

Avec cette disposition il suffisait, pour obtenir l'effet électrique continu, de réunir en temps opportun le disque C avec l'arbre N'N'. Ce que l'on pouvait faire, soit au moyen d'une surface de mercure remplissant une coupe *d* dans laquelle plongeait d'une manière permanente le disque C, et que venait rencontrer l'aiguille *b* à chaque demi-révolution accomplie par l'électro-aimant, soit au moyen de deux coupes également remplies de mercure dans lesquelles plongeaient les deux extrémités d'un circuit, et qui étaient placées à portée du disque C et de l'aiguille *b*; soit enfin en interposant entre le disque C et le mercure une communication métallique à l'aide d'un fil de fer très-fin. Si la position de l'aiguille *b* était bien réglée, on obtenait dans le premier cas une étincelle très-brillante chaque fois que l'aiguille sortait du mercure. Dans le second, on parvenait à produire la décomposition de l'eau ou des communications très-énergiques. Enfin, dans le troisième, on obtenait la fusion du fil métallique interposé.

Comme il faut un certain temps pour que l'induction se développe, le moment où le dégagement électrique atteint son maximum dans les machines, ne correspond pas précisément aux positions géométriques des bobines d'induction par rapport aux pôles de l'aimant fixe; ainsi, l'expérience démontre que le dégagement électrique résultant

de la désaimantation (c'est celui qui est le plus fort et qui produit les étincelles et les commotions) n'atteint son maximum que quand l'électro-aimant se trouve placé selon la ligne équatoriale de l'aimant fixe. Il en résulte donc que l'aiguille interruptrice, dans l'appareil de Jaxton, devait être placée de manière à ce qu'elle ne quittât le mercure que quand les bobines d'induction se trouvaient dans la position que nous venons d'indiquer. (Voir fig. 4 bis.)

Dans la machine que nous venons de décrire, les courants induits peuvent être recueillis, mais ils ne sont pas régularisés. Or il importe, dans les applications mécaniques que l'on peut faire des courants d'induction, de les avoir toujours dans le même sens, et pour cela on est obligé d'adapter à l'appareil un commutateur à renversement de pôles. Nous avons décrit avec détails, page 279, le commutateur qu'on emploie le plus généralement; mais, pour en comprendre le jeu, il est important que nous expliquions ici comment les quatre dégagements électriques qui se manifestent dans chacune des bobines d'induction pour chaque révolution accomplie par elles ne nécessitent qu'une seule inversion de courant, comme nous l'avons admis dans la description que nous avons faite du commutateur en question. Nous admettrons d'abord que les boutons d'attache P et O (fig. 18, pl. IV) de ce commutateur soient en rapport avec les fils IT, KT' (fig. 6, pl. VII), qui servent de rhéophores aux bobines d'induction. D'après l'explication que nous avons donnée de la création des courants d'induction au sein des bobines M, M' (fig. 6, pl. VII), on est en droit de conclure que chacune de ces bobines, en passant devant les deux pôles de l'aimant fixe, se trouve sillonnée par quatre courants qui sont tous en sens contraire les uns des autres. Par conséquent, le courant direct qui naîtra au moment où la spirale M, par exemple, s'éloignera du pôle N de l'aimant,

sera dirigé dans cette spirale dans le même sens que le courant inverse qui succédera à ce courant, et qui sera créé au moment où cette même spirale M s'approchera du pôle S de l'aimant. En effet, la réaction d'induction opérée par les deux pôles de l'aimant s'effectuant d'une manière diamétralement opposée sur une même spirale, le courant inverse créé par le pôle N correspond au courant direct créé par le pôle S, et réciproquement, le courant inverse créé par le pôle S correspond au courant direct créé par le pôle N. Or, comme dans le mouvement de rotation des bobines d'induction, la réaction d'induction produite par leur approche du pôle S succède à la réaction produite par leur éloignement du pôle N, il en résulte que les courants créés dans chaque demi-révolution des bobines, à gauche ou à droite de la ligne axiale de l'aimant fixe, n'ont pas besoin d'être redressés. Ce n'est donc qu'après chaque-demi-révolution que le commutateur doit agir; et c'est en effet ce qui arrive dans le commutateur que nous avons décrit, page 279.

Ordinairement dans les machines construites par M. Clarke et M. Ruhmkorff, l'aimant fixe est disposé verticalement contre le support de la roue motrice, afin de réduire le volume de l'appareil. Alors l'électro-aimant et ses bobines d'induction tournent vis-à-vis des pôles de l'aimant fixe, dans un plan parallèle à celui de cet aimant. Le commutateur est derrière l'électro-aimant, et les boutons d'attache sont en dehors de la boîte qui renferme tout l'appareil. La fig. 7, pl. VII, représente une machine de ce genre.

Dans d'autres machines d'induction, fondées sur le même principe, l'aimant fixe et la roue motrice sont disposés horizontalement, et le reste de l'appareil est dans le même rapport avec ces deux pièces que dans le système où elles sont disposées dans un plan vertical.

Enfin plusieurs constructeurs, je ne sais trop pour quelle raison, réunissent les deux pôles de l'électro-aimant par une traverse de cuivre.

Les machines de Clarke sont ordinairement accompagnées de plusieurs petits appareils accessoires pour la fusion des fils métalliques, l'inflammation de l'alcool, l'inflammation de la poudre, etc., etc.; on les adapte soit sur l'axe du commutateur qui se termine par un carré d'ajustement, soit sur le rectangle de bois où sont fixés les ressorts de ce commutateur. La disposition de ces différentes pièces est indiquée très-longuement dans l'ouvrage de M. Chevalier, intitulé le *Physicien préparateur*. Comme cette question est tout à fait en dehors du but que je me suis proposé dans cet ouvrage, je n'en parlerai pas davantage; j'ajouterai seulement que des bobines de rechange sont nécessaires pour pouvoir réaliser toutes les expériences que l'on peut faire avec ces sortes de machines. Il faut en effet qu'on puisse créer à volonté de l'électricité de quantité et de l'électricité de tension, et pour cela il faut que les bobines d'induction soient tantôt composées de gros fil, et tantôt composées de fil fin. C'est pourquoi les bobines à gros fil sont dites *bobines de quantité*, tandis que les autres sont appelées *bobines de tension*.

Machine de M. Pixii. La grande machine magnéto-électrique que M. Pixii a construite, en 1832, pour la Sorbonne, lors du cours de M. Ampère, est fondée sur le même principe que la machine de Jaxton; seulement c'est l'aimant persistant qui est mobile et l'électro-aimant qui est fixe; le tout est disposé verticalement sur un grand bâti qui porte en son milieu une table vernissée à la gomme laque sur laquelle se trouve le commutateur. A l'époque où cette machine a été construite, on n'avait pas encore eu l'idée d'opérer les contacts métalliques par des frotteurs, et les commutateurs étaient toujours construits d'après

celui de M. Ampère, c'est-à-dire à bascules, avec des rigoles pour le mercure. Aussi est-ce un commutateur de ce genre qui a été adapté à la machine de Pixii, et ce commutateur était mis en mouvement par des excentriques fixées sur l'arbre portant l'aimant.

Avec cet appareil, on a pu décomposer de l'eau en assez grande quantité et faire rougir des fils de platine.

Machine de M. Page. La machine de M. Page est double, en ce sens, que l'électro-aimant qui doit recevoir l'induction tourne entre les pôles de deux aimants fixes en fer à cheval. En conséquence, cet électro-aimant, au lieu d'avoir ses deux branches réunies par une traverse commune, forme deux aimants droits indépendants l'un de l'autre et montés sur le même axe de rotation. Ce système est de plus enveloppé par un cylindre de cuivre, qui porte une roue pour établir une connexion mécanique avec la source de puissance dont on veut se servir pour maintenir la machine en mouvement.

Le commutateur appelé par l'inventeur *unitrep* est double et monté sur l'axe de rotation aux deux bouts opposés des bobines électro-aimants. Il se compose, comme celui que nous avons déjà décrit, d'une virole d'ivoire sur laquelle sont incrustés, aux deux extrémités d'un même diamètre, deux segments d'argent en rapport avec les extrémités des fils des bobines. Deux frotteurs pour chaque unitrep distribuent ensuite le courant induit à deux boutons spéciaux.

Comme les aimants fixes sont disposés les uns vis-à-vis des autres par leurs pôles opposés, que les bobines ont leur fil enroulé comme nous l'avons expliqué précédemment, et que l'action inductrice est simultanée sur les deux électro-aimants à la fois, le renversement de sens du courant sur les frotteurs s'opère naturellement par le fait seul de la rotation des unitreps qui présentent à ces frotteurs, à chaque demi-révolution, un segment en rapport avec un

courant inverse. Les frotteurs et les boutons qui sont en communication avec eux représentent donc constamment les mêmes pôles et peuvent par conséquent être combinés à la manière des pôles d'une pile pour l'accumulation des effets électriques.

Machine magnéto-électrique multiple de M. Wheatstone. Cette machine n'est qu'une complication de la précédente, mais le principe et les détails mécaniques en sont absolument les mêmes, particulièrement les commutateurs. Elle fait réagir à la fois six gros aimants en fer à cheval sur cinq systèmes de doubles bobines montées sur le même axe horizontal. Pour que le courant induit soit tout à fait continu, ces systèmes de bobines sont disposés sur l'axe commun de manière que leur plan présente, pour chacun d'eux, une inclinaison différente. Alors les différentes inductions se succèdent et dissimulent les intermittences. Les aimants fixes sont placés sur leur champ, afin que chaque système d'électro-aimant puisse être influencé à la fois par les quatre pôles des aimants entre lesquels il tourne. Les commutateurs sont placés sur l'axe dans l'intervalle qui sépare chaque système, et les frotteurs aboutissent tous suivant leur position à deux bandes métalliques placées en dessus et en dessous d'une traverse de bois disposée en conséquence. Ces bandes à leur tour correspondent à deux boutons d'attache qui représentent les deux pôles d'une pile galvanique.

En raison de la plus grande force qui est exigée pour la rotation de ce système multiple, la transmission du mouvement de la grande roue à la petite se fait par un engrenage, au lieu de se faire par un système de poulies.

Machine magnéto-électrique de l'usine à gaz des Invalides. La plus grande machine magnéto-électrique qui ait été jusqu'à présent construite, est celle qu'on a installée dernièrement à l'hôtel des Invalides dans le but d'extraire électriquement de l'eau le gaz hydrogène. Cette applica-

tion, il est vrai, a très-médiocrement réussi; mais la machine magnéto-électrique elle-même, telle qu'elle existe actuellement, a pu fournir une assez grande quantité d'électricité pour entretenir plusieurs becs de lumière électrique. Nous verrons plus tard que cette application des machines magnéto-électriques serait d'une extrême importance pour la marine.

La machine magnéto-électrique de l'usine à gaz des Invalides se compose de six machines distinctes exactement faites sur le même modèle, et chacune d'elles renferme 48 aimants fixes (à fer à cheval) devant lesquels tournent 5 roues munies chacune de 16 bobines d'induction. La fig. 8, Pl. VII, représente une vue perspective d'une de ces machines dédoublée qui est établie, en ce moment, au Conservatoire des Arts-et-Métiers.

Les aimants fixes supportés par des traverses en bois sont distribués, comme on le voit, par séries de trois autour d'une circonférence ayant pour centre l'arbre moteur des bobines d'induction. Cét arbre est supporté par deux coussinets dont l'un se voit en A à côté des poulies de transmission de mouvement. Les roues portant les bobines d'induction sont montées sur cet arbre de manière que ces bobines circulent entre deux séries consécutives d'aimants fixes, et reçoivent par leurs extrémités opposées un effet d'induction double. Une de ces roues s'aperçoit sur la figure dans le vide laissé par les aimants. Le cercle de bois qui en recouvre les rayons est destiné à réunir les courants individuels des bobines d'induction pour les diriger de là sur le commutateur qui se voit en C. Chaque roue a son commutateur, et ce commutateur est le même que celui des machines de Clarke, à cette différence près que l'anneau métallique où se fait la permutation, au lieu d'être coupé en deux, est divisé en huit parties égales correspondant aux huit positions des aimants fixes. L'un des deux frotteurs

de ce commutateur se distingue en B, l'autre est caché par la poulie de transmission; il consiste dans un petit marteau de cuivre placé à l'extrémité d'une lame de bois fixée sur l'une des traverses du bâti de l'appareil.

Le bec de ce marteau, solidement appuyé sur le commutateur, est engagé dans une rainure circulaire faisant partie du commutateur lui-même, afin qu'il ne dévie pas de sa position. Cette forme de marteau qu'on a donnée aux frotteurs a été nécessitée par l'usure considérable qu'ils subissent, laquelle usure est comparable à celle des freins des voitures. Avant qu'on ne les ait ainsi construits, il fallait les renouveler presque tous les jours.

Les bobines d'induction sont disposées normalement au plan de la roue qui les porte, et sont fixées sur sa circonférence à l'aide de boucles en cuivre solidement boulonnées. Comme le mouvement de rotation qui leur est imprimé est très-rapide et qu'elles passent extrêmement vite d'un aimant à l'autre, on a remplacé les cylindres de fer des bobines de Clarke par des tubes de fer munis de rainures longitudinales. De cette manière, les désaimantations s'opèrent plus promptement, et le courant induit est plus énergique. D'un autre côté, afin d'obtenir de l'électricité de quantité, chaque bobine a été enroulée de quatre fils différents. Ces fils sont réunis ensemble à leur sortie de la bobine et sont soudés aux petites lames de cuivre que l'on voit sur le disque de bois DC. Quand on veut obtenir de l'électricité de quantité, ces petites lames communiquent alternativement à deux circonférences métalliques, de manière à ce que tous les bouts de fils de même ordre soient en rapport avec une même circonférence. Alors ces circonférences sont reliées au commutateur comme les fils qui réunissent les bouts des deux spirales dans les machines de Clarke. Quand, au contraire, on veut obtenir de l'électricité de tension, ces lames sont réunies entre elles par séries

comme les pôles d'une pile en tension. En disposant à portée de ces lames un commutateur du genre de celui de la fig. 19 (pl. III), on pourrait même obtenir à volonté de l'électricité de tension et de l'électricité de quantité avec la même machine.

Les machines magnéto-électriques de grande puissance sont employées depuis longtemps à Birmingham pour la galvanoplastie. Elles ont produit les meilleurs résultats. En France, on ne les a pas encore utilisées dans ce but. Mais il faut espérer, maintenant que des machines puissantes existent, qu'on entreprendra de nouvelles expériences, et qu'on pourra créer une nouvelle industrie fondée sur la magnéto-électricité.

Machines magnéto-électriques à mouvement alternatif. On emploie souvent en Angleterre un système de machine magnéto-électrique dans lequel l'éloignement des bobines d'induction des pôles de l'aimant fixe est obtenu à l'aide d'un levier bascule à l'extrémité duquel elles sont montées, comme on le voit, fig. 9, pl. VII. C'est l'appareil magnéto-électrique réduit à sa plus simple expression. M. Henley, à Londres, en construisant pour ces sortes de machines des aimants excessivement puissants, est parvenu à leur faire produire des courants assez énergiques pour fournir des étincelles à distance. Un simple coup de poignet appliqué sur le manche de ces appareils suffit pour réaliser les effets que nous venons d'indiquer. M. Henley destine ces appareils à l'explosion des mines; seulement comme leur prix est infiniment plus élevé que celui de l'appareil de Ruhmkorff, ce dernier sera toujours choisi de préférence.

En disposant, l'un à côté de l'autre, deux aimants droits un peu puissants X et Y (fig. 10) et adaptant devant leurs pôles contraires NS, SN, deux électro-aimants M, M' fixés à l'extrémité de leviers articulés CD, EF, M. Henley est parvenu à faire une machine magnéto-électrique assez

puissante, pouvant fournir deux courants différents. Ces courants avaient une énergie aussi grande que si les aimants droits eussent constitué un aimant en fer à cheval, et cela se comprend si l'on considère qu'au moment où, dans une pareille machine, l'on fait réagir l'un ou l'autre des deux électro-aimants M et M' en rapport avec les deux circuits, celui de ces électro-aimants M' qui n'est pas écarté, constitue une traverse magnétique qui fait des deux aimants droits X et Y les deux branches d'un aimant en fer à cheval, tandis que l'autre électro-aimant M reçoit l'induction.

Ce système a été appliqué par M. Henley à la télégraphie électrique.

MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES FONDÉES SUR LA SUSPENSION DU COURANT MAGNÉTIQUE PAR UNE RÉACTION STATIQUE.

Pour comprendre le principe sur lequel reposent les machines magnéto-électriques dont nous allons maintenant parler, il faut se reporter à la théorie que nous avons exposée, pages 152, 153 et 154. Il résulte de cette théorie que, par l'effet de l'apposition d'une armature de fer doux sur les deux pôles d'un aimant, on condense les fluides du courant magnétique de ce dernier, et on paralyse son mouvement.

Pour obtenir avec ce système des courants induits il ne s'agit donc que de placer sur les branches de l'aimant persistant lui-même les bobines d'induction et de faire tourner vis-à-vis de ses pôles une armature de fer doux comme on fait tourner dans les autres machines les bobines d'induction elles-mêmes. Seulement ces courants sont précisément inverses de ceux des machines de Clarke; car l'effet est diamétralement opposé. En effet, quand l'armature des machines de Clarke s'approche des pôles de l'aimant fixe,

le courant qui est créé est un courant inverse, parce que c'est le moment où le courant magnétique prend naissance dans l'armature. Au contraire, avec la même position de cette armature dans les machines que nous étudions en ce moment, c'est un courant direct qui est produit, parce que c'est dans cette position que le courant magnétique de l'aimant fixe (qui est alors le courant inducteur) est paralysé.

Plusieurs physiciens se disputent la priorité de cette innovation apportée aux machines magnéto-électriques ; mais, d'après les renseignements qui m'ont été donnés, il paraîtrait que ce serait M. Dujardin qui aurait, le premier, opéré la transportation des bobines d'induction de l'armature sur l'aimant fixe, et que ce seraient MM. Breton frères qui auraient construit la première machine à rotation fondée sur ce principe. Quoi qu'il en soit, ce qui est certain, c'est que cette machine a été, pour MM. Breton frères, l'objet de plusieurs récompenses accordées en 1841, 1849, 1851 et 1855.

Machine magnéto-électrique de MM. Breton frères. Cette machine se compose principalement d'un aimant en fer à cheval I, fig. 11, muni, comme nous venons de le dire, sur chacune de ses branches, d'une bobine de bois sur laquelle est enroulée une certaine quantité de fil recouvert de coton. Ces bobines sont fixes, et l'aimant peut, en les traversant, être rapproché plus ou moins de son armature au moyen d'une vis de rappel, ce qui règle la force du courant d'induction. Ainsi établi, l'appareil (comme les machines de Clarke) peut fournir un courant, mais ce courant est faible, et doit, pour être rendu suffisamment énergique par rapport aux effets physiologiques, être interrompu à des intervalles de temps un peu écartés, pour que la charge ait le temps de s'accumuler dans le fil. En conséquence, l'appareil porte sur le pivot de rotation de

l'armature un interrupteur sur lequel appuie un frotteur en rapport avec l'une des extrémités du fil d'une des bobines. Ces bobines d'ailleurs sont enroulées dans le même sens comme les bobines d'un électro-aimant et sont reliées ensemble par les extrémités homologues de leur fil. Enfin l'extrémité libre du fil de la bobine qui n'est pas reliée au frotteur est en communication avec le coussinet sur lequel tourne le pivot de l'armature. Il résulte de cette disposition qu'en interposant le corps humain dans un circuit en rapport, d'un côté avec le frotteur de l'interrupteur, de l'autre avec le pivot de l'armature, on complète un circuit dérivé dont le courant principal est fermé par l'interrupteur; ce qui revient bien à l'effet produit par le commutateur des machines de Clarke, comme nous l'avons expliqué pag. 279 et 280.

Comme l'appareil de MM. Breton frères est destiné principalement à la médecine, et que le courant direct seul donne les commotions, l'interrupteur qui a été adopté est l'interrupteur éliminateur décrit page 281. Pourtant en substituant à cet interrupteur celui des machines de Clarke, on pourrait faire de cet appareil une machine d'induction à courants continus dans un même sens.

Quant au mécanisme rotateur de l'armature, il consiste, comme celui des machines de Clarke, dans deux roues d'inégal diamètre mises en relation de mouvement par une chaîne de Vaucanson ou par un engrenage. Le tout est renfermé dans une boîte dont il ne sort que la manivelle, les deux boutons d'attache pour le circuit, la vis du graduateur et le fer armature que l'on doit toujours placer sur les pôles de l'aimant pour qu'il ne s'affaiblisse pas.

Cet appareil est accompagné de nombreux accessoires pour les applications médicales dont nous parlerons dans le prochain volume quand nous en serons à ce chapitre.

Depuis quelque temps, MM. Breton frères ont fait un

modèle très-soigné de leur appareil dans lequel l'un des côtés de la boîte est vitré afin de laisser voir le mécanisme intérieur. Dans ce modèle, un commutateur à renversement de pôles a été ajouté et le bouton qui le fait mouvoir se trouve au milieu de la glace. Une aiguille que ce commutateur porte indique dans quel sens circule le courant suivant qu'on le tourne à gauche ou à droite.

Machine magnéto-électrique de M. Duchenne, de Boulogne. M. Duchenne, de Boulogne, est celui de tous les médecins qui a le plus appliqué l'électricité à la médecine, et les remarques nombreuses qu'il a été à même de faire dans l'exercice de ses fonctions sur les effets physiologiques de cet élément, l'ont amené à perfectionner successivement les appareils d'induction et à en faire des instruments véritablement médicaux.

Ayant plusieurs fois constaté que les courants d'induction qui naissent dans les plis de l'hélice inductrice des machines électro-magnétiques, dont nous allons parler bientôt, exercent physiologiquement un effet tout à fait différent de celui des courants secondaires créés dans l'hélice induite, et ayant reconnu que les premiers ont une action spéciale sur la sensibilité musculaire, tandis que les autres réagissent sur la sensibilité cutanée, M. Duchenne chercha à combiner ses appareils, de manière à développer au même degré ces deux sortes de réactions, afin de pouvoir les utiliser suivant les cas. Pour obtenir cette égalisation de force entre des courants qui, dans les machines ordinaires, sont si différents d'intensité, il pensa qu'il fallait diminuer la grosseur du fil inducteur et en augmenter beaucoup la longueur. De cette manière, il put produire, en effet, des courants presque aussi énergiques dans le fil inducteur que dans le fil induit, mais bien différents, comme je l'ai déjà dit, quant aux effets physiologiques. Il donna le nom de courants de premier ordre aux courants nés dans le fil

inducteur et de courants de second ordre aux courants nés dans le fil induit.

La différence des effets physiologiques des courants de premier et de deuxième ordre ayant été reconnue, M. Duchenne chercha à obtenir des machines magnéto-électriques ces deux sortes de courants en recouvrant le fil de leurs bobines d'induction d'un second fil beaucoup plus fin. Il pensait avec raison que le courant produit dans ces bobines devait être assimilé aux courants de premier ordre ou à l'*extra-courant* des machines électro-magnétiques, et, par conséquent, qu'un fil fin enveloppant ces bobines devait jouer le rôle du fil induit dans ces mêmes machines électro-magnétiques. L'expérience lui démontra que ses conjectures étaient fondées, et c'est ainsi qu'il obtint avec ses appareils deux modes d'électrisation différents.

Après avoir disposé ses appareils d'après ce nouveau principe, M. Duchenne chercha des moyens de graduation pour chacun des deux courants. Les tubes métalliques lui en fournirent le moyen, et en les employant conjointement avec le graduateur imaginé par MM. Breton et un commutateur à interruptions variables, il se trouva en possession, pour les machines magnéto-électriques, de trois modes de graduation différents.

Dans la machine de M. Duchenne, l'aimant au lieu d'être mobile comme dans l'appareil précédent, est fixe, et c'est l'armature et tout son système rotatoire qui sont mobiles. A cet effet les supports de tout ce système sont montés sur une plate-forme à coulisses G F, qui peut être plus ou moins avancée au moyen d'une forte vis de rappel N adaptée sur la tablette fixe. Cette vis porte une aiguille O, et cette aiguille en parcourant les différentes divisions d'un cercle gradué, peut désigner avec une exactitude rigoureuse la distance qui sépare l'armature de l'aimant fixe.

La figure ci-dessous représente l'appareil magnéto-électrique de M. Duchenne.

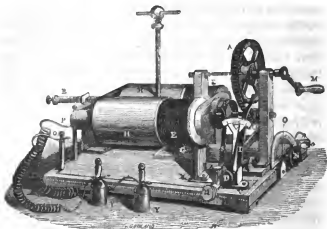


Fig. 41.

En temps ordinaire, quand l'armature est collée contre les pôles de l'aimant fixe, un contre-poids *c* adapté à la vis *N* tend à disjoindre l'armature de l'aimant, afin de surexciter la force magnétique de celui-ci.

L'aimant fixe est composé de deux barreaux fortement aimantés, réunis par une barre de fer de manière à constituer un aimant en fer à cheval. Il porte, comme dans l'appareil de Breton, les bobines d'induction et, sur ces bobines, que l'on voit en *E, E*, peuvent glisser les deux cylindres graduateurs en cuivre *H, H*. Ces tubes, comme nous l'avons dit, peuvent graduer l'intensité des courants induits particulièrement du courant secondaire, indépendamment de l'approche et de l'éloignement de l'armature des pôles de l'aimant. Il s'échange en effet, entre ces tubes et les courants induits, des réactions qui affaiblissent d'autant

plus ces derniers que les cylindres sont plus enfoncés sur les bobines. Or, un guide gradué R qui passe au-dessus du socle de l'aimant, indique les différents degrés d'enfoncement de ces cylindres régulateurs.

L'interrupteur B est fixé, comme dans tous les appareils d'induction, sur l'axe de rotation de l'armature C; il peut fournir quatre interruptions par rotation, c'est-à-dire une pour chaque courant inverse, et une pour chaque courant direct, ou bien deux seulement sur les courants directs. Pour faire la permutation, il suffit de pousser le frotteur S un peu à droite ou à gauche.

Dans l'application de l'électricité à la médecine, il est souvent important d'électriser par saccades, c'est-à-dire par séries de courants interrompus. Pour obtenir ce résultat, M. Duchenne a adapté à la circonférence de la roue motrice A quatre chevilles, deux courtes et deux longues, sur lesquelles peut frotter; quand il est suffisamment incliné à gauche ou à droite, un ressort I. Lorsque ce ressort est tout à fait incliné vers la droite il ne rencontre aucune des chevilles de la roue motrice; mais s'il est incliné convenablement il peut être touché deux ou quatre fois par chaque rotation de cette roue, suivant que son inclinaison le met à portée des chevilles les plus longues ou des chevilles les plus courtes. On est assuré de ces différents degrés d'inclinaison du ressort I par un index O sur lequel se meut une aiguille fixée sur le même axe que ce ressort. Le bouton D sert à opérer ce double mouvement. Comme le bâti du système moteur de l'appareil est en rapport métallique avec les hélices induites, et que, pour arriver aux boutons d'attache du circuit le courant est obligé de passer par le ressort I, il s'ensuit que chaque frottement du ressort I contre les chevilles de la roue motrice a pour effet de transmettre la série de réactions électriques produites par le commutateur pendant la durée de ce frottement.

Pour assurer la continuité métallique du circuit induit, lorsque l'on n'emploie pas ce dernier système d'interrupteur, un ressort F a été adapté à l'axe du frotteur I, de telle manière que quand ce frotteur ne rencontre pas les chevilles de la roue motrice il touche la plaque qui sert de support au bâti sur lequel est installé le système moteur. Il résulte de cette disposition que les courants induits, au lieu de passer par la roue A et le ressort I, traversent directement l'axe FD et ne subissent alors que les interruptions du commutateur.

Dans la figure que nous avons donnée de cet instrument, les extrémités des deux circuits induits aboutissent à quatre boutons d'attache, dont deux se voient en P et en Q. Mais comme dans la pratique il importe souvent de passer instantanément et alternativement d'un circuit à l'autre, M. Duchenne a adapté à ses nouveaux appareils un commutateur qu'il suffit de tourner dans un sens ou dans l'autre pour transporter, à travers le circuit sur lequel on veut agir, l'un ou l'autre des deux courants induits. Avec ce commutateur, par conséquent, les points d'attache des rhéophores sont invariables.

Machine magnéto-électrique de M. Dujardin. — Cette machine n'est en quelque sorte que le principe de celles que nous venons d'étudier. Tout le système de rotation de l'armature est supprimé, et celle-ci, en faisant charnière autour des pôles de l'aimant, peut être écartée ou rapprochée de celui-ci à l'aide d'un manche.

Cette articulation de l'armature peut se faire de deux manières : dans le sens axial de l'aimant ou dans le sens équatorial. Ce dernier mode a été employé par M. Glæsner pour ses horloges électriques.

MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES A BOBINES
D'INDUCTIONS COMBINÉES.

Si l'on considère que le fer à cheval, sur lequel sont placées les bobines d'induction dans la machine de Clarke, joue, par rapport à l'aimant fixe, le rôle d'une simple armature, tandis qu'il réagit sur le fil qui le recouvre, comme un véritable aimant dont le courant magnétique se trouve alternativement surexcité et détruit, on concevra facilement qu'en remplaçant, dans les machines que nous venons d'étudier, l'armature de fer doux par un électro-aimant de Clarke, on obtiendra deux sources d'électricité d'induction au lieu d'une. Seulement, comme ces sources sont placées dans des conditions opposées, l'une par rapport à l'autre, puisqu'un courant inverse est créé dans les bobines de l'aimant, alors qu'un courant direct prend naissance dans celles de l'armature, le commutateur devra être combiné en conséquence, si l'on veut réunir ensemble les deux réactions électriques produites.

M. Nollet paraît être le premier qui ait eu l'idée de cette combinaison des deux systèmes de machines magnéto-électriques, mais c'est M. Gaiffe, gendre de M. Loiseau, qui les a exécutés jusqu'à présent de la manière la plus satisfaisante. Ce constructeur est parvenu en effet à produire des courants induits aussi énergiques que ceux qui résultent d'une machine de Clarke ordinaire, avec un appareil qui est renfermé dans une boîte de 7 centimètres de largeur et de hauteur sur 12 centimètres de longueur. La figure 12, pl. VII, représente cet appareil : les bobines de l'armature sont en A et B, et celles de l'aimant en C et D. L'expérience a démontré que la grosseur de fil la plus convenable pour cet appareil, au point de vue de ses réactions physiologiques, était le n° 28 pour les premières, et le n° 24 pour les secondes ; il est vrai que les bobines A et

B, au lieu d'être enroulées en sens inverse, comme celles des machines de Clarke, sont enroulées dans le même sens.

Le commutateur D, adopté par M. Gaiffe, est celui des machines de Clarke ordinaires combiné à l'interrupteur E de l'appareil de MM. Breton frères. Ce commutateur, il est vrai, ne redresse pas les courants, mais comme cet appareil est destiné aux applications électro-médicales, ce redressement n'était pas nécessaire. Toutefois, voici comment ce commutateur devrait être disposé si on voulait obtenir de cet appareil des courants continus : le petit manchon d'ivoire, sur lequel sont fixés les deux demi-anneaux du commutateur de Clarke, se prolongerait de manière à porter deux anneaux pleins ; un frotteur fixé sur le bâti de l'appareil appuierait sur chaque anneau, et ces frotteurs seraient en rapport avec les extrémités du fil des bobines C, D ; une liaison métallique à travers l'ivoire serait établie entre les deux demi-anneaux du commutateur de Clarke et les deux anneaux pleins dont nous venons de parler, de telle manière que les extrémités des bobines C, D, A, B qui seraient alors réunies ensemble deux à deux, pussent fournir toujours, sur les deux demi-anneaux du commutateur, la même électricité pour chaque induction différente. Les deux ressorts appuyant sur ces deux anneaux recueilleraient alors le courant, comme dans les machines de Clarke ordinaires. En se servant de l'axe de rotation comme moyen de transmission électrique, on pourrait supprimer un des deux anneaux pleins dont nous avons parlé ; alors le commutateur n'aurait que trois frotteurs.

APPAREILS D'INDUCTION VOLTAÏQUE.

Un appareil d'induction voltaïque se compose de quatre éléments : 1° d'une spirale en gros fil à travers laquelle circule un courant voltaïque ; 2° d'une spirale de fil fin qui

enveloppe la première spirale, ou s'enroule en même temps qu'elle sur la bobine, et dans laquelle prend naissance le courant induit ; 3° d'un faisceau magnétique de fer doux que l'on introduit à volonté à l'intérieur de la première spirale ; 4° d'un interrupteur de courant. La première spirale est dite spirale ou hélice inductrice ; la seconde est appelée spirale ou hélice induite.

Pour obtenir des courants d'induction, il n'est pas nécessaire d'introduire à l'intérieur de l'hélice inductrice le faisceau magnétique, la réaction seule du courant voltaïque suffit pour les faire naître ; mais le courant induit atteint une bien plus grande énergie quand le faisceau magnétique réagit de concert avec le courant.

Bien que nous ayons désigné sous le nom d'hélice induite la seconde spirale qui enveloppe l'hélice inductrice, cette dernière se trouve également induite par suite des réactions réciproques de ses spires, comme le prouve le développement considérable de l'étincelle à l'interrupteur et l'accroissement d'énergie du courant qui la traverse. Le courant résultant de cette induction a été appelé, par les physiciens, *extra-courant*, et constitue ce que M. Duchenne appelle le courant de premier ordre des appareils d'induction voltaïque.

M. Masson est un des premiers qui aient perfectionné les appareils d'induction voltaïque. Voulant obtenir de cette source d'électricité des effets électriques continus, il pensa, en 1836, à employer comme interrupteur du courant inducteur une roue métallique sur les dents de laquelle il faisait frotter une lame de ressort. Cette roue était mise en rapport avec le fil du circuit inducteur, tandis que le ressort frotteur était en relation avec l'un des pôles de la pile, et comme l'autre pôle de cette pile correspondait directement avec le circuit inducteur, les fermetures et les interruptions du courant voltaïque se succédaient à des

intervalles d'autant plus rapprochés que le ressort était tourné plus vite. M. Masson put constater alors que les courants créés avaient une tension considérable, et que les effets physiologiques qu'ils exerçaient pouvaient être appliqués utilement à la médecine. Plusieurs perfectionnements, entre autres la substitution des interrupteurs mécaniques à la roue dentée, furent ensuite successivement apportés aux appareils d'induction, de sorte que ceux-ci constituèrent bientôt une des applications les plus importantes de la science électrique.

Les premiers interrupteurs mécaniques qui furent adaptés aux appareils d'induction étaient mis en mouvement par un mécanisme d'horlogerie. Mais ce système, en outre de l'élévation de prix qu'il occasionnait dans l'achat de l'appareil, était susceptible de nombreux dérangements et nécessitait de fréquentes réparations; il fallait, d'ailleurs, remonter à des intervalles très-rapprochés le mécanisme, et c'était un soin assujettissant qu'il était absolument nécessaire d'éviter. On a donc dû rechercher un système plus continu et plus régulier, et le rhéotome de Delarive est venu fort à propos pour résoudre la question. Quel est celui qui le premier a apporté à ces instruments cet heureux perfectionnement? Il serait difficile de le préciser, car plusieurs instruments ainsi disposés ont été construits presque en même temps par plusieurs constructeurs; pourtant il paraîtrait que ce serait M. Neef qui aurait la priorité. Il est vrai que MM. Breton avaient déjà construit, pour ce genre d'appareils, un interrupteur électro-magnétique; mais cet interrupteur diffère essentiellement du rhéotome de M. Delarive. Quoi qu'il en soit, je vais décrire ceux de ces appareils qui sont les plus importants et les plus connus.

Appareil d'induction de M. J. Mirand. — Cet appareil présente la disposition la plus généralement adoptée dans les appareils communs, dits machines à commotions. Dans

cet instrument, d'ailleurs, d'un très-petit volume, la bobine d'induction est en bois. Son fil inducteur d'environ deux millimètres de section est le premier enroulé, et présente quatre couches d'hélices superposées. Le fil d'induction est très-fin (le n° 16 du commerce); il est enroulé en quantité considérable au-dessus du premier, et ses deux bouts viennent aboutir aux deux boutons d'attache des Rhéophores.

Les extrémités du gros fil inducteur correspondent l'une à un des boutons d'attache du circuit voltaïque, l'autre à l'interrupteur de De La Rive. Celui-ci que nous avons déjà décrit, page 298, est tout à fait à part et placé auprès de la bobine d'induction. En conséquence, il possède un petit électro-aimant spécial dont le fil est interposé dans le circuit inducteur. Cette interposition fait que toutes les vibrations produites par l'interrupteur se trouvent répétées dans le courant inducteur lui-même, et excitent dans le fil induit les courants qui doivent réagir physiologiquement par l'intermédiaire des manipules.

Pour régler la force de son appareil, M. Mirand prend un cylindre de fer-blanc qu'il enfonce plus ou moins dans la bobine d'induction; quand ce cylindre est tout à fait enfoncé, les commotions sont à leur maximum, quand on le supprime, elles sont à leur minimum. Cependant, comme dans cette dernière condition elles sont encore très-énergiques, M. Mirand indique comme moyen d'affaiblissement de retirer plus ou moins hors de l'acide nitrique le charbon de la pile de Bunzen qui fait marcher l'appareil.

Appareil d'induction de MM. Breton frères. — Comme interrupteur du courant inducteur, MM. Breton frères ont eu l'idée d'employer un tourniquet électro-magnétique, obligé pour tourner de produire lui-même la rupture successive du courant. En partant de ce principe, ils ont disposé, à portée d'un électro-aimant droit horizontal, un axe vertical portant un interrupteur et quatre morceaux de fer

disposés en croix. L'interrupteur était tellement organisé que quand chaque morceau de fer s'approchait du fer de l'électro-aimant, le courant était fermé; tandis qu'il était ouvert au moment du passage des branches du tourniquet devant l'électro-aimant, et un peu au delà. Pour chaque révolution du tourniquet il y avait donc quatre interruptions de courant. Or, comme ces tourniquets font moyennement 400 tours par minute, on obtenait ainsi 1600 vibrations par minute, profitables pour le courant d'induction.

Le fil d'induction était enroulé sur une bobine spéciale très-mince, qui pouvait être enfoncée sur l'électro-aimant droit de l'appareil, de manière à recouvrir complètement ou en partie le fil de cet électro-aimant devenu alors fil inducteur. Quand cette bobine d'induction le recouvrait entièrement, le courant induit était à son maximum, mais il diminuait rapidement d'énergie à mesure qu'on retirait la bobine et qu'on laissait ainsi moins de fil exposé à l'induction directe du courant.

Appareil Volta-féradique de M. Duchenne. — Nous avons déjà vu, page 368, que la découverte qu'il avait faite des réactions différentes, exercées par les courants de premier et de deuxième ordre, avait conduit M. Duchenne à augmenter considérablement la longueur du fil inducteur des appareils d'induction, et à en diminuer la grosseur. Le fil inducteur de ses appareils n'a en effet guère plus de 1 millimètre $1/2$ de section. Mais, étant parvenu par cette disposition à augmenter la puissance des courants de premier ordre, il lui fallait trouver un moyen de régler l'énergie de ce courant, comme il avait réglé la force du courant de deuxième ordre. Pour y parvenir, il s'imagina d'interposer entre le faisceau magnétique introduit à l'intérieur de l'hélice inductrice et cette hélice elle-même, un tube de cuivre qu'il pouvait, par une disposition particulière, enfoncer plus ou moins. Ce tube, il est vrai, devait réagir sur

les deux courants induits à la fois, mais en raison de sa plus grande proximité du courant de premier ordre, il devait l'affecter d'une manière plus particulière. C'est en effet ce que l'expérience lui démontra. Par suite du même raisonnement il conserva, comme gradateur du courant de deuxième ordre, le second tube dont il avait déjà muni les bobines d'induction de son appareil magnéto-électrique.

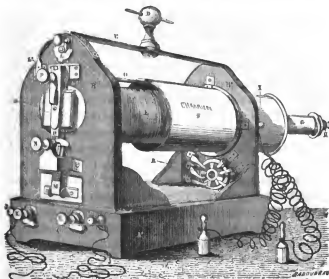


Fig. 12.

La figure ci-dessus représente l'appareil Volta-féradique de M. Duchenne tel qu'il l'a perfectionné dernièrement. On voit en E la bobine d'induction munie de son fil, en F le cylindre gradateur du courant de deuxième ordre, et en G le tube gradateur du courant de premier ordre. L'interrupteur est placé verticalement sur le côté latéral de l'appareil; il a été également modifié par M. Duchenne afin

de pouvoir être réglé facilement depuis les interruptions les plus lentes jusqu'aux interruptions les plus multipliées. Il se compose d'une plaque carrée de fer doux O suspendue à une charnière, et réagissant par un buttoir d'ivoire P sur une lame de ressort flexible M en rapport avec l'une des extrémités de l'hélice inductrice. Une vis buttoir N, en communication avec la pile, est, en temps ordinaire, en contact avec le ressort, et par suite de ce contact le courant est fermé à travers l'appareil. La plaque de fer se trouve alors attirée par le faisceau magnétique qui est placé devant elle, et le buttoir P, en séparant le ressort de la vis N, interrompt le courant qui est rétabli l'instant d'après par suite de l'inertie survenue dans le faisceau magnétique. C'est, comme on le voit, un interrupteur de De La Rive dans lequel le courant, au lieu de passer par l'armature et son buttoir d'arrêt, passe dans un rhéotome spécial afin de laisser libre le règlement de l'écart de cette armature, règlement qui s'opère à l'aide du bouton P.

L'interrupteur à roue dentée L que l'on voit au-dessus du rhéotome est destiné à des électrisations saccadées dans lesquelles le courant ne doit être interrompu qu'à des intervalles éloignés. M. Duchenne croit que les interruptions ainsi produites étant plus nettes, les effets d'induction sont plus énergiques.

Comme l'appareil magnéto-électrique de M. Duchenne, l'appareil Volta-féradique est muni d'un commutateur qui transmet dans un même circuit, soit le courant de premier ordre, soit le courant de deuxième ordre. Ce commutateur se voit sur la figure précédente au-dessous de la bobine d'induction. Dans la figure 13, qui représente le côté caché de l'appareil de la fig. 12, ce commutateur est en G.

On le tourne au moyen du bouton G, et l'aiguille qu'il porte indique, par sa position, sur un index, de quel côté

on doit tourner pour faire réagir le courant de premier ou de second ordre.

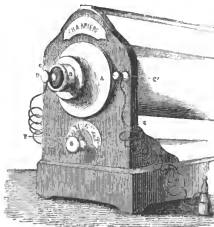


Fig. 13.

Sur cette dernière figure les deux tubes sont entièrement enfoncés dans l'appareil; mais on peut en distinguer les extrémités en A et en B; le bout du faisceau magnétique de fer doux se voit en D.

La figure 14 représente le premier appareil Volta-féradique de M. Duchenne, monté sur sa boîte d'ustensiles et recouvert de son enveloppe. A l'extrémité gauche de cette boîte on distingue un tube IK muni d'une tige Bd. C'est un graduateur liquide destiné à affaiblir les courants induits dans un rapport plus grand que les graduateurs tubulaires. Ce graduateur néanmoins ne réagit d'une manière bien marquée que sur les courants de premier ordre. Les autres, malgré la longueur de la colonne d'eau distillée interposée entre l'extrémité de la tige dF et la douille I qui termine le tube, sont à peine affaiblis.

Dans cet appareil, l'interrupteur de De La Rive est en AS, l'interrupteur à roue dentée en D. La boule qui le surmonte, et qui se voit aussi dans les autres appareils, ne sert que de poignée pour le rendre plus facilement transportable.

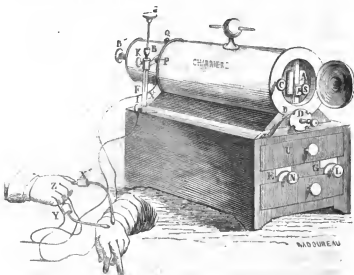


Fig. 44.

Machine d'induction de Ruhmkorff. La tension considérable qu'il avait remarquée dans les courants d'induction issus des réactions de la pile, préoccupa tellement M. Masson dès ses premières expériences avec l'appareil à roue dentée imaginé par lui, qu'il songea à en tirer parti pour obtenir les effets de l'électricité statique. Vers l'année 1842, en effet, il fit construire, conjointement avec M. Bréguet, un appareil assez considérable qui lui démontra que ses espérances étaient parfaitement fondées; car, malgré le mauvais isolement des fils, et bien que l'extra-courant, c'est-à-dire le courant d'induction créé dans le fil inducteur

lui-même eût été seul employé, il put obtenir dans le vide une étincelle assez énergique pour pouvoir constater l'inégal pouvoir lumineux des deux pôles du circuit. Il parvint même à charger un condensateur et à illuminer un fil de platine placé dans l'œuf électrique.

Après ces curieuses recherches, la question théorique se trouvait éclaircie, et l'on était en droit d'admettre que l'électricité voltaïque, grâce à ses réactions d'induction, pouvait être transformée en électricité statique. Mais le problème n'en était pas pour cela résolu pratiquement, et les machines électriques, malgré leurs caprices, n'étaient pas encore détrônées.

En 1851, M. Ruhmkorff, habile constructeur fort connu par tous les physiciens, mettant à profit les expériences et les observations de MM. Masson et Bréguet, chercha à combiner l'appareil d'induction de manière à ce qu'il pût recevoir, sans la perdre, l'électricité statique fournie par la réaction du courant voltaïque. Il s'appliqua pour cela au parfait isolement des fils, qu'il noya pour ainsi dire dans de la gomme laque, et prit le soin de faire aboutir sur des colonnes de verre les extrémités du fil induit, pensant avec raison que le bois qui isole l'électricité voltaïque n'isole pas suffisamment l'électricité statique. D'un autre côté, ayant constaté que ce n'était pas la longueur ou le développement des spires de l'hélice induite qui entraînait l'accroissement de l'effet électrique, mais bien leur multiplicité, il restreignit considérablement les dimensions de l'appareil Bréguet-Masson, et ne chercha à augmenter les bobines d'induction que dans le sens de leur longueur. Considérant, en outre, que d'après la manière même dont s'opérait l'induction, une très-grande résistance de la part du circuit induit était la condition indispensable pour la tension de l'électricité qui s'y trouvait développée, il prit pour ce circuit induit du fil très-fin et très-long (dans ses grands appareils, la longueur

de ce fil varie de 8 à 10 kilomètres). Enfin, étant convaincu que la réaction des courants magnétiques était plus utile au développement du courant induit que la réaction seule du courant inducteur, il enfonça à l'intérieur de l'hélice inductrice un faisceau de fils de fer dont les courants magnétiques individuels, en s'ajoutant, réagissaient plus énergiquement que le seul courant créé dans un cylindre unique de fer. Comme interrupteur du courant inducteur, il employa le petit mécanisme de De La Rive et le disposa de manière à ce qu'il pût être réglé.

Ainsi construit, l'appareil d'induction a fourni des résultats surprenants; l'étincelle a pu être échangée à distance, non-seulement par la disjonction du circuit induit, mais encore en la provoquant avec un corps étranger au circuit. Échangée dans le vide entre les deux boules de l'œuf électrique, cette étincelle a pu remplir le ballon et présenter ce magnifique phénomène de la lumière stratifiée, dont nous aurons occasion de parler plus tard.

Tel était le point où les appareils d'induction étaient arrivés quand M. Fizeau, faisant des recherches de son côté sur ces effets d'induction, trouva le moyen de les amplifier encore par l'interposition, dans le courant inducteur, d'un simple condensateur. Dès lors les étincelles purent être échangées à près de deux centimètres de distance à l'air libre, sous la forme de dards bruyants et crépitants.

Avec un semblable appareil, les commotions sont tellement violentes, que M. Quet, faisant un jour des expériences dans un appartement obscur et s'étant approché trop près des fils de l'instrument, fut renversé sur le coup, et aurait pu être foudroyé sans l'arrivée de M. Ruhmkorff, qui vint heureusement à temps. Il dut, à la suite de cette violente secousse, garder quelque temps le lit : la pile ne se composait pourtant que de six éléments.

Il est temps de décrire l'appareil de Ruhmkorff ainsi mo-

diffé, et nous allons le faire le plus clairement qu'il nous sera possible.

Plusieurs dispositions plus ou moins élégantes ont été prises par cet habile constructeur. Dans les unes, la bobine d'induction est couchée horizontalement, et l'interrupteur est placé sur le côté à l'un des bouts; dans les autres, cette bobine est disposée verticalement, et l'interrupteur est au-dessous. Cette dernière disposition est la plus élégante; mais depuis que M. Ruhmkorff a reconnu l'efficacité des longues bobines, il a repris l'autre disposition, qui est représentée fig. 13, pl. VII.

Le corps de la bobine, dans ces appareils, est ordinairement en carton mince et les rebords en verre, ou bien, si les rebords sont en bois, le tout est garni d'une épaisse couche de gomme laque. Sur cette bobine se trouvent enroulées, comme nous l'avons dit, deux hélices métalliques parfaitement isolées, l'une composée de gros fil (d'environ 2 millimètres), l'autre composée de fil fin (le n° 16 du commerce). Les extrémités de ces hélices ressortent des rebords de la bobine par des tubes de verre, si ces rebords sont en bois, ou simplement par des trous, s'ils sont en verre. Dans notre dessin, les extrémités du gros fil viennent s'attacher à des colonnes de cuivre I et O, tandis que les extrémités du fil fin aboutissent aux boutons B et C montés sur des colonnes de verre.

Les points d'attache des rhéophores de la pile sont placés en A et A' des deux côtés du commutateur KL; ils communiquent à des ressorts qui, en rencontrant les plaques conductrices du commutateur, renvoient le courant dans l'hélice de gros fil par des lames métalliques disposées en conséquence. Ces communications métalliques se prolongent du côté de l'interrupteur de l'appareil pour se terminer par deux boutons d'attache G et H, où l'on peut recevoir l'extra-courant, c'est-à-dire le courant d'induction

créé dans le circuit inducteur lui-même, et qui permettent d'adapter à l'appareil tout système d'interrupteur que l'on veut.

Le commutateur et le rhéotome de l'appareil de Ruhmkorff ont déjà été décrits avec détails, page 265 et 298. Ils sont placés aux deux extrémités de la bobine. Quant au condensateur, dont M. Fizeau a découvert la fonction importante, comme nous l'avons vu, il a été combiné et adapté à l'appareil de la manière la plus heureuse par M. Ruhmkorff. Il est formé de deux feuilles de papier d'étain, collées des deux côtés d'une bande de taffetas gommé d'environ 12 pieds de longueur et repliées entre deux autres bandes de ce même taffetas, de manière à pouvoir être introduites dans l'intérieur de la planche servant de support à l'appareil. Les armures de ce condensateur sont en rapport avec les boutons d'attache G et H où peut être recueilli l'extra-courant. Le rôle que ce condensateur joue dans cette action physique n'est pas encore expliqué d'une manière bien satisfaisante. Suivant M. Fizeau, il aurait pour effet de *condenser* et de détruire, par une action statique, l'électricité de tension ou d'induction qui crée précisément l'extra-courant dans le fil inducteur, et qui réagit sur le circuit induit d'une manière nuisible. Quand ce condensateur est interposé, on voit effectivement l'étincelle de l'interrupteur diminuer d'intensité et le courant induit prendre, au contraire, une plus grande extension.

Les effets de la machine de Ruhmkorff peuvent être considérablement augmentés, soit par la réunion en tension ou en quantité de plusieurs appareils vibrant à l'unisson l'un de l'autre, sous l'influence d'une même source électrique ou de plusieurs sources électriques, soit par l'interposition, dans le courant induit, d'un condensateur d'une surface proportionnée au nombre d'éléments de pile réagissant sur l'appareil. Je n'entrerai dans aucuns détails à

cet égard, car tous les phénomènes qui se rapportent à cet appareil ont été longuement développés dans un ouvrage spécial que j'ai publié sur l'appareil Ruhmkorff, et auquel je renverrai les lecteurs ; je me contenterai d'indiquer ici sommairement ceux de ces phénomènes qui sont les plus curieux et les plus importants, et qui ont été découverts par MM. Masson, Grove, Quet, Gaugain, Gassiot, Becquerel et moi.

L'appareil étant mis en action avec un seul élément Bunsen bien chargé, on peut constater les faits suivants :

1° Une étincelle longue d'environ un centimètre et demi, peut être échangée entre les deux pôles de l'appareil ;

2° Le pôle extérieur peut fournir des étincelles à distance en les provoquant avec un conducteur étranger au circuit ;

3° L'étincelle peut être provoquée de la part du circuit inducteur et à travers même les vases de verre ou de faïence de la pile, en employant comme excitateur un rhéophore en rapport avec le pôle extérieur de l'appareil ;

4° L'un des pôles (le pôle négatif), qui sera terminé par un fil de fer très-fin, sera brûlé, tandis que l'autre pôle, placé dans les mêmes conditions, ne rougira même pas ;

5° L'étincelle pourra être influencée par un fort courant d'air, et donnera lieu à des filets lumineux contournés en zigzags, qui la sillonneront dans toute son étendue ;

6° La flamme d'une bougie ou d'une lampe allongera l'étincelle par son interposition dans le circuit, et la fera dévier de la ligne droite ;

7° L'étincelle aura un aspect différent suivant la nature des rhéophores employés comme excitateurs : avec du charbon, elle sera éclatante comme un point de lumière électrique ; sur l'eau elle donnera lieu à des ramifications de couleur différente aux deux pôles du circuit, etc. ;

8° L'étincelle d'induction produira la combinaison des éléments de l'air et la conversion de l'oxygène en ozone ;

9° L'étincelle pourra apparaître dans les liquides sous certaines conditions ;

10° Les courants induits ne seront pas interrompus par l'interposition d'une lame de verre dans leur circuit, à la condition que les deux côtés de cette lame de verre seront munis de deux lames métalliques assez larges pour constituer un condensateur. Il en résulte que l'électricité pourra s'échanger entre deux lames de verre placées parallèlement l'une à côté de l'autre sous la forme d'une pluie de feu ;

11° Cet effet de condensation et de transmission des courants induits donnera lieu à un rayonnement lumineux autour des surfaces métalliques servant de condensateur ;

12° L'étincelle, en traversant le vide, produira une belle lumière rouge en forme de fuseau au pôle positif, et une lumière bleue, limitée dans ses contours, au pôle négatif ;

13° Dans un vide fait sur une vapeur combustible, la lumière rouge du pôle positif sera sillonnée transversalement par des bandes obscures, mobiles et de différentes largeurs, suivant les circonstances de l'expérimentation ;

14° Cette lumière, qui pourra provenir du pôle extérieur du courant induit seulement, pourra être dirigée et recourbée à volonté par un corps quelconque qu'on présentera devant le récipient dans lequel on a fait le vide ;

15° On pourra illuminer dans le vide un fil de platine ;

16° On pourra allonger considérablement l'étincelle par l'interposition d'une dorure appliquée sur un corps isolant, par exemple en l'échangeant sur la tranche dorée d'un livre ; on pourra encore l'allonger par l'interposition de corps de conductibilité secondaire, tels que les limailles métalliques, la poussière de charbon, les liquides conducteurs divisés en gouttelettes très-fines, certains sulfures ou composés métalliques, etc., etc. Alors elle forme de véritables éclairs en zigzags qui, dans certaines circonstances, présentent les mêmes caractères que ceux de la foudre ;

17° On pourra analyser d'une manière très-commode les raies du spectre de l'étincelle électrique échangée entre les différents métaux ;

18° On pourra reproduire des effets de fluorescence en exposant un dessin fait avec du sulfate de quinine ou un verre teint avec de l'oxyde d'urane à la lumière rouge que présente l'étincelle dans le vide ;

19° On pourra, avec ces sortes de courants d'induction, obtenir à volonté les décompositions polaires de la pile ou les décompositions photo-électriques des machines ;

20° Enfin, on pourra appliquer les effets calorifiques de l'étincelle à l'explosion des mines.

Appareil d'induction de M. Cecchi, de Florence. — L'appareil de M. Cecchi, de Florence, n'est qu'une modification de la machine de Ruhmkorff, faite en vue d'augmenter la puissance de celle-ci. Le moyen adopté par l'auteur pour réaliser cet accroissement de puissance consiste à éliminer le courant inverse, et par conséquent à n'utiliser que le courant direct, en ayant soin de renverser le sens du courant inducteur à chaque interruption, afin de détruire complètement le magnétisme du fer qui atteint précisément en ces moments-là son maximum d'intensité, et dont la persistance ne peut qu'être préjudiciable au développement du courant induit. D'après ce que nous assure M. Cecchi, la force de l'appareil serait augmentée dans le rapport de 1 à 20. Ce chiffre me paraît bien exagéré.

Voici, du reste, la description que fait *la Rievraazione*, journal des sciences physiques de Florence, des trois modifications apportées par M. Cecchi à l'appareil de Ruhmkorff :

« 1° A la place du faisceau de fils de fer, le professeur Cecchi introduit dans la grande bobine de Ruhmkorff le fer doux d'un de ses électro-aimants à rochet (voy. *la Rievraazione*, p. 46), ayant les dimensions convenables, et dont

les pôles sortant des extrémités de la bobine se terminent par deux gros cubes massifs de fer ;

« 2° On applique sur chacune des faces latérales et bien dressées de ces cubes des plaques de fer doux servant de contact et longues autant que tout l'appareil. Le grand rochet ressemble ainsi à un gros parallépipède de fer d'où l'on voit sortir, par quatre trous pratiqués sur un des contacts, les quatre bouts des fils conducteurs renfermés dans de petits tubes de verre. Si les contacts ont assez d'épaisseur on peut n'en appliquer que trois et laisser entièrement libre la quatrième face, d'où sortent alors les fils conducteurs du courant inducteur et du courant induit ;

« 3° Le marteau rhéotome de De La Rive, employé par Ruhmkorff, est à simple effet, en ce que les courants de la pile qui parcourent successivement le gros fil ont tous la même direction. Le professeur Cecchi se sert, à la place, d'un commutateur tournant à double effet, qui alterne la direction du courant inducteur et maintient constante la direction du courant induit.

« Quoique ce savant n'ait opéré qu'avec de petits appareils, la nature des effets obtenus, et que nous allons exposer, ne laisse aucun doute sur l'importance de ceux que l'on pourra obtenir en employant de plus grands appareils.

« Un électro-aimant à rochet, long de 105^{mm}, dont le cylindre intérieur avait un diamètre de 11^{mm}, et les pôles une longueur de 20^{mm} et un diamètre de 37^{mm}, portait enroulés sur un petit cylindre deux fils de cuivre couverts de soie de 0^{mm}33 d'épaisseur, et longs chacun de 50 mètres. Dans un de ces fils passait le courant d'une petite pile de Daniell, l'autre était traversé par les courants induits. Ces derniers étaient mesurés tantôt à l'aide d'un galvanomètre de Melloni, construit par Ruhmkorff, tantôt au moyen d'un multiplicateur à aiguille non astatique, et par conséquent beaucoup moins sensible.

Les deux gros pôles de l'électro-aimant n'étaient pas cylindriques. On les avait travaillés à faces planes parallèles et perpendiculaires, de manière à pouvoir y appliquer plusieurs contacts de fer doux ; les pôles étaient fixés par des vis aux deux bouts du cylindre intérieur. On pouvait ainsi les ôter et les remettre à volonté ; de même que l'on pouvait retirer de la bobine et y remettre le petit cylindre. L'électro-aimant se démontait ainsi en quatre morceaux séparés : les deux pôles, le petit cylindre intérieur et la bobine. Il est inutile de dire que l'électro-aimant était toujours situé à une telle distance des galvanomètres qu'il ne pouvait guère avoir d'influence sur leurs aiguilles. Nous ne rapporterons ici que quelques-uns des nombreux résultats numériques obtenus par le professeur Cecchi.

« Les courants d'induction ont été mesurés dans les cas suivants :

- 1° La bobine étant seule et sans fer doux ;
- 2° Avec le petit cylindre ;
- 3° Après avoir vissé les deux cubes aux extrémités du petit cylindre ;
- 4° En appliquant aux pôles ainsi produits un ou plusieurs contacts en fer doux.

« Dans tous ces cas, on a mesuré au galvanomètre le courant *inverse* ou de *première induction* produit par la fermeture du circuit, et le courant *direct* ou de *seconde induction* dû à l'ouverture du circuit ;

5° Enfin, à l'aide du commutateur, on renversait la direction du courant au moment même où l'on ouvrait le circuit, de sorte que la polarité du fer changeait tout à coup.

« Voici le nombre de degrés indiqués par le galvanomètre dans plusieurs séries d'expériences très-soignées. Dans la première expérience on a fait usage du multiplicateur de Melloni.

	1 ^{re} induct.	2 ^e induct.
	deg.	deg.
La bobine seule sans fer	1/2	1/2
Avec le petit cylindre.	7	7
Avec les deux cubes.	20	19
Et un contact du poids de 0 ^g 792	90	58

« Lorsqu'on voulut faire usage du commutateur, l'aiguille fut lancée avec une telle violence contre le petit arrêt du galvanomètre, qu'elle recula brusquement jusqu'à la rencontre du petit arrêt opposé.

« Comme le multiplicateur de Melloni était trop sensible, on employa dans les autres expériences un galvanomètre plus paresseux, en conservant toujours la même pile constante.

« L'induction dans la bobine seule ne fut pas assez forte pour faire dévier l'aiguille. On employa alors tout de suite le commutateur, et l'on obtint pour les courants d'induction les degrés suivants :

	Degrés.
Avec le petit cylindre.	1
— en renversant le courant.	2
Après avoir ajouté les deux pôles.	5
— et le contact de 0 ^g 792.	8 1/2
— en inversant le courant	17
— en ajoutant encore d'autres petits contacts et en renversant le courant.	22

« Nous allons rapporter enfin les résultats de quelques expériences dans lesquelles on avait changé le fil de la bobine. Le courant principal parcourait 50 mètres de fil de 0^{mm}667 ; les courants induits se propageaient à travers un fil long de 100^m et de l'épaisseur de 0^{mm}333. Ce second fil était enroulé autour du premier.

« La bobine étant vide, l'aiguille du galvanomètre ne bougea pas sous l'action du courant induit. L'on n'employa le commutateur que pour la dernière expérience. Voici les

déviation obtenues à l'ouverture et à la fermeture du circuit principal (2° et 1° induction).

	1re ind.	2e ind.
Avec le petit cylindre.	$1\frac{1}{2}^{\circ}$	$1\frac{1}{2}^{\circ}$
— et les deux cubes.	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$
— et le contact de 0*792.	5	$4\frac{1}{2}$
En faisant usage du commutateur dans plusieurs expériences.	15	15

« Il résulte clairement des nombres que nous venons de citer, que les perfectionnements apportés par le professeur Cecchi à l'appareil de Ruhmkorff ne sont pas sans importance. Le premier perfectionnement (forme du fer de l'électro-aimant) repose sur une découverte originale¹; quant aux autres, l'auteur y a été conduit 1° par la connaissance de ce fait que le courant induit est beaucoup plus intense lorsque les pôles d'un électro-aimant sont réunis par un contact, quoique le magnétisme résidu influe singulièrement pour diminuer l'énergie des courants qui suivent une première aimantation; 2° par la loi bien connue que le mouvement du courant accroît l'énergie de l'induction.

« Le professeur Cecchi, en donnant à tous les courants induits la même direction, n'a pas eu pour but d'utiliser les courants dont l'effet serait détruit, d'après M. Du Moncel, mais seulement d'employer tout le courant induit direct qui naît au moment où le fer cesse d'être aimanté. En dirigeant le courant en sens inverse au moment de l'ouverture du circuit, on détruit tout le magnétisme résidu, et le fer prend une polarité contraire. Le commutateur qui redresse les courants d'induction devient ainsi une conséquence de celui qui alterne les courants principaux. Les

1. De très-habiles physiiciens ont montré combien le courant induit direct est plus énergique que le courant inverse dans la production des phénomènes physiologiques, chimiques, etc., quoique les deux courants indiquent parfois le même nombre de degrés au galvanomètre.

perfectionnements dont il a été question jusqu'ici permettent d'obtenir 20 fois au moins plus d'effet de l'appareil modifié par le professeur Cecchi que de la machine primitive de Ruhmkorff, du moins pour certains effets, ce qui n'est déjà pas à mépriser. »

Machine d'induction de M. Poggendorff. — Cette machine n'est encore qu'une modification de l'appareil de Ruhmkorff à laquelle M. Poggendorff croit avoir apporté d'importants perfectionnements. Ces perfectionnements consistent :

1° A partager la bobine d'induction en un certain nombre de compartiments par des cloisons isolantes, et à recouvrir successivement, avec le fil induit, chaque compartiment en n'enroulant sur chacun d'eux qu'un nombre impair d'assises, afin que le fil passe régulièrement d'une division à l'autre, et se termine aux deux extrémités de l'appareil ;

2° A plonger préalablement les fils métalliques, entourés de soie, qui doivent constituer les deux hélices de la bobine, dans un bain de blanc de baleine ou d'acide stéarique, ou même dans un mélange de cire et d'huile, fortement échauffé au-dessus de son point de fusion, afin d'empêcher la matière isolante de se solidifier brusquement au contact du fil et de lui permettre de pénétrer profondément la couche de soie qui entoure ce dernier ;

3° A enrouler les hélices sur un cylindre de verre soutenu à ses extrémités par des montants en gutta-percha, et à les recouvrir d'une feuille de taffetas verni ;

4° A donner à la bobine la forme d'un fuseau aminci vers ses deux extrémités ;

5° A composer la spirale inductrice de deux fils séparés au lieu d'un, afin d'en faire à volonté un conducteur de section double ou d'une longueur double ;

6° A former le faisceau magnétique de fils de fer plus gros que ceux employés par Ruhmkorff, et à les écarter les uns des autres pour isoler leurs courants magnétiques ;

7° A isoler l'interrupteur rhéotomique de l'appareil, afin de pouvoir le faire agir dans des conditions différentes et des milieux différents ;

8° A employer, pour les condensateurs, au lieu de tafetas gommé, des feuilles de papier à lettre enduites d'une dissolution de cire à cacheter dans l'alcool, ou des feuilles de papier ciré recouvertes d'un vernis à la gomme laque.

La supériorité de l'appareil de M. Poggendorff sur celui de Ruhmkorff n'est pas encore assez démontrée par les résultats qu'il a fournis pour que nous exprimions une opinion arrêtée à cet égard. Je crois, néanmoins, qu'il faut se défier quelquefois des perfectionnements conseillés *uniquement* par la théorie.

Parmi les perfectionnements que nous venons d'énumérer, il en est deux auxquels MM. Fabre et Kunemann avaient été conduits depuis longtemps, et qu'ils réalisent dans les machines d'induction qu'ils confectionnent; c'est la forme *en fuseau* de la bobine et le mode d'enroulement du fil induit, dont les deux bouts aboutissent aux deux extrémités de l'appareil. La forme en fuseau de la bobine serait commandée, d'après ces constructeurs, par les réactions mêmes du courant inducteur qui seraient à leur maximum au milieu de cette bobine.

Appareil d'induction de M. Paul de Vigan. — MM. Masson et Breguet ont été les premiers, comme nous l'avons déjà dit, qui aient eu l'idée d'employer des commutateurs à renversement de pôles pour la régularisation des courants d'induction voltaïque ; mais leur interrupteur et leur commutateur devaient être tournés à la main, comme on le fait pour les machines de Clarke, ce qui ne donnait, dès lors, aucuns avantages aux appareils d'induction voltaïque sur les machines magnéto-électriques. M. Paul de Vigan, le premier, semble avoir résolu le problème de la mise en mouvement de ces commutateurs par la machine elle-

même. Il prétend que par ce moyen il a pu décomposer l'eau avec un seul élément de pile ; mais il n'y a dans ce fait rien de surprenant, puisqu'avec le condensateur électro-chimique de De La Rive on peut arriver au même résultat sans redressement des courants induits. Cet appareil est, du reste, excessivement simple. Il n'est autre que l'appareil d'induction voltaïque de MM. Breton frères, auquel a été adapté le commutateur à renversement de pôles, décrit page 278.

J'ai essayé d'adapter à la machine de Ruhmkorff un commutateur à renversement de pôles disposé de manière à ne pas laisser se perdre l'électricité de tension fournie par cet appareil, mais cette combinaison était tout à fait inutile, puisque, dans les courants ainsi produits, le courant inverse est complètement annihilé. Aussi n'ai-je pu constater aucune différence entre les phénomènes produits par les deux appareils.

MACHINES ÉLECTRIQUES A FROTTEMENT.

L'électricité fournie par les machines électriques à frottement n'a été jusqu'à présent guère utilisée. Cela tient à ce que ses réactions magnétiques étant à peu près nulles, et ses réactions chimiques étant très-complexes, elle ne présente, dans la plupart des applications qu'on pourrait en faire, aucun avantage sur les piles. Néanmoins, comme les machines électriques ont reçu dans ces derniers temps de notables perfectionnements, nous croyons qu'il sera intéressant d'en dire quelques mots à la fin de ce chapitre sur les machines d'induction, car elles aussi sont des machines d'induction.

Tout le monde connaît les machines électriques à plateau de verre. La forme généralement adoptée aujourd'hui est celle qui a été proposée par Ramsden ; les conducteurs et les coussins ont reçu, il est vrai, depuis, quelques modifi-

cations, mais la disposition générale des différentes parties est à peu près la même.

Une machine électrique se compose : 1° d'un plateau de verre serré entre quatre coussins ; 2° de conducteurs métalliques isolés sur des pieds de verre ; 3° de deux mâchoires métalliques armées de pointes et placées à l'extrémité des conducteurs, de manière à emboîter des deux côtés opposés le plateau de verre.

Dans ces machines, la cause initiale du dégagement électrique est le frottement exercé sur le plateau de verre par les coussins ; mais l'électricité qui charge les conducteurs résulte de la décomposition des fluides de ces conducteurs, par l'influence de l'électricité dégagée sur le plateau de verre. Effectivement, cette influence ayant pour effet d'attirer vers les mâchoires l'électricité de nom contraire à celle développée sur le plateau de verre, et de repousser l'électricité de même nom, la première, trouvant par les pointes dont sont armées les mâchoires, une issue facile pour se dégager, vient se combiner à l'électricité du plateau de verre, et remet celui-ci à son état naturel ; la seconde électricité, au contraire (celle qui est repoussée), charge alors à elle seule les conducteurs, et cette charge est d'autant plus grande que la soustraction du fluide attiré par le plateau de verre a été plus considérable.

Pour qu'une machine électrique puisse bien fonctionner, en supposant même qu'elle soit dans une atmosphère sèche, il faut qu'elle réunisse plusieurs conditions : il faut 1° que la glace du plateau soit peu alcaline pour qu'elle attire le moins possible l'humidité, et, sous ce rapport, les verres anciens sont préférables aux verres nouveaux, à moins qu'on ne les ait fabriqués spécialement ; 2° il faut que les frottoirs soient disposés convenablement ; 3° que les conducteurs soient bien isolés. Dans sa notice sur la photométrie électrique, M. Masson donne tous les renseignements

possibles sur la manière de réaliser le plus avantageusement ces conditions. Nous ne pouvons mieux faire que de renvoyer le lecteur à cet important travail, inséré dans les *Annales de physique et de chimie*, de l'année 1847.

Quand l'atmosphère est humide, les machines électriques ne donnent pas d'électricité. Pour les mettre alors en état d'en produire, il faut disposer autour d'elles plusieurs réchauds afin de dessécher les couches d'air qui les entoure; il faut aussi laver leur plateau avec de l'alcool ou de l'éther. Toutefois, ces précautions ne sont pas toujours suffisantes.

Les machines électriques ordinaires ne fournissent que de l'électricité vitrée, l'électricité résineuse, qui est soustraite par les coussins, s'écoule dans le sol par les montants en bois qui supportent ces coussins. Plusieurs constructeurs, entre autres MM. Nairne et Van Marum, se sont imaginé de recueillir cette électricité perdue sur des conducteurs spéciaux, et ils ont obtenu ainsi des machines électriques fournissant à la fois les deux électricités. Pour résoudre ce problème, il leur a suffi de monter les coussins de leurs machines sur des supports isolants, et de faire communiquer ceux-ci à des conducteurs isolés semblables d'ailleurs à ceux des machines ordinaires.

Les plus grandes machines électriques qu'on ait construites jusqu'ici sont celles du musée de Harlem, de l'Institut polytechnique de Londres et du Conservatoire de Paris.

La première peut fournir des étincelles d'un mètre, et la seconde a pu fondre un fil métallique sur une longueur de 21 pieds. Cette dernière machine a présenté un phénomène réellement extraordinaire. En opérant la décharge à travers un tube de 12 pieds, dans lequel le vide avait été fait, l'étincelle de cette machine s'est présentée sous la forme d'une boule de feu animée d'un faible mouvement de transport.

Depuis quelques années on a cherché à remplacer le plateau de verre, dans les machines électriques, par des corps moins hygrométriques, moins chers et moins cassants. Pour cela on a eu successivement recours au papier, à la gutta-percha et au caoutchouc durci. Toutes ces machines ont fourni le résultat qu'on en attendait ; mais, malgré leur meilleur marché, elles n'ont pas encore été adoptées. M. Croissant, à Laval, est celui qui a le mieux réussi pour les machines électriques en papier. D'un autre côté, MM. Fabre et Kunemann assurent que leurs machines en caoutchouc durci sont excellentes. Quant aux machines en gutta-percha, elles ont été à peu près abandonnées en raison de la facile détérioration de cette substance par l'effet du frottement. Dans une machine de ce genre qui figurait à l'exposition de Londres en 1851, c'était une courroie de gutta-percha enroulée sur deux poulies qui remplaçait le plateau de verre des machines ordinaires.

Electrophore. — Il existe un appareil électrique très-simple, appelé électrophore, que l'on peut employer quand on a besoin d'avoir à sa disposition une faible source d'électricité. Cet appareil se compose d'un gâteau de résine et d'un plateau conducteur d'un diamètre un peu moindre. Ce plateau est muni d'un manche isolant qui sert à le poser et à le relever. Les deux pièces de l'appareil étant bien séchées, on électrise le gâteau en le battant avec une peau de chat ; à mesure qu'on approche le plateau, ses électricités sont décomposées par influence, le fluide vitré est attiré sur la face inférieure et le fluide résineux repoussé sur la face supérieure ; au contact le maximum d'effet est produit ; mais la couche d'air qui reste entre les deux surfaces suffit pour empêcher presque complètement la communication électrique ; ainsi, en relevant le plateau, on le retrouverait à peu près à l'état naturel. Il faut donc, avant de le relever, le toucher avec le doigt ; on voit alors jaillir une étincelle ;

c'est le fluide repoussé qui s'écoule ; l'autre est retenu par l'influence. Lorsque ensuite on relève le plateau par l'extrémité de son manche isolant, l'électricité vitrée redevient libre et donne à son tour une étincelle non moins vive que la première.

Puisque le gâteau de résine n'a exercé qu'une action par influence, il a conservé son fluide résineux et l'on peut, pendant des heures entières, poser le plateau et le relever toujours chargé d'électricité vitrée.

L'électrophore devient ainsi une source d'électricité qui donne sans rien perdre ; au reste, quand elle s'affaiblit, quelques coups de peau de chat lui rendent sa force.

Machine électrophorique de M. Girarbon. — M. Girarbon voulant obtenir de l'électrophore une source puissante d'électricité, s'est imaginé de combiner ensemble plusieurs de ces appareils et de les soumettre mécaniquement à un même mouvement, susceptible de surexciter à la fois leurs propriétés électriques.

Qu'on imagine fixées verticalement, les unes au-dessous des autres, sur deux bandes *rigides isolantes*, 20, 30, 40, 100 plaques métalliques (dont les carres ont été soigneusement arrondies), communiquant entre elles, de telle manière que toutes les plaques paires soient réunies ensemble par un fil, et que toutes les plaques impaires soient également réunies par un autre fil. Qu'on imagine encore, fixée au milieu de chaque intervalle de séparation de ces plaques, une traverse de bois de sapin revêtue de peau de chat. On comprendra qu'un pareil système, circulant entre de doubles plaques de résine ou de caoutchouc durci disposées convenablement, représentera un rhéophore multiple dont les effets pourront s'additionner. En effet, supposons que les doubles plaques de résine, entre lesquelles circulent les plaques métalliques et les frottoirs en peau de chat, soient moitié moins nombreuses que ces dernières plaques, tout

en occupant le même espace qu'elles, il arrivera qu'au moment où les plaques paires du système mobile s'approcheront des doubles plaques de résine pour s'introduire entre elles, les plaques métalliques impaires sortiront de ces systèmes de doubles plaques pour se présenter dans l'intervalle qui les sépare. Or, dans ce mouvement accompli par le système mobile, les frottoirs en peau de chat ont précédé les plaques métalliques; il y a donc eu d'une part électrisation des plaques de résine, et de l'autre décomposition des fluides naturels de celles des plaques métalliques qui se sont avancées sous les plaques résineuses. Le fluide repoussé, c'est-à-dire le fluide résineux, a donc dû charger le fil communiquant à ces plaques; mais, dans le même mouvement, celles des plaques métalliques qui étaient sous les plaques de résine, et dont le fluide vitré avait été condensé, se sont éloignées de ces dernières plaques, et cette électricité vitrée, qui était demeurée jusque-là dissimulée, est devenue libre et a chargé le fil en rapport avec elles. Par ce système on obtient donc un double dégagement électrique qui peut être utilisé comme celui des machines de Nairne et de Van Marum, et qui peut être augmenté indéfiniment par le nombre des éléments.

La disposition du système précédent étant un peu encombrante, et nécessitant un mouvement de va-et-vient de la part du moteur, M. Girarbon a combiné son appareil de manière à pouvoir être adapté à un mouvement circulaire, et à présenter ses éléments de champ les uns à côté des autres.

Dans ce système, les doubles gâteaux de résine ou de caoutchouc durci sont placés verticalement les uns à côté des autres comme les auges d'une pile; ils peuvent même être taillés circulairement pour donner plus d'élégance à l'appareil.

Les plaques métalliques en rapport avec chacun de ces couples de résine, et constituant chacune un plateau circu-

laire composé de deux demi-cercles de cuivre, isolés l'un de l'autre, sont fixées sur un même axe de rotation, et disposées de manière à pouvoir circuler librement au milieu de ces couples résineux. Pour qu'elles soient suffisamment isolées, les deux demi-cercles de cuivre qui les composent sont reliés l'un à l'autre par deux traverses en matière isolante, et ces traverses elles-mêmes sont portées par une traverse de bois fixée sur l'axe de rotation du système. Cette traverse de bois se trouve placée dans l'intervalle de séparation des deux lames circulaires, et c'est sur elle qu'est adaptée la peau de chat; enfin, deux fils métalliques soudés aux lames circulaires aboutissent, à une très-petite distance de l'axe de rotation, à deux tiges métalliques horizontales terminées par des boules qui vont d'un bout de l'appareil à l'autre, parallèlement à l'axe de rotation. C'est sur ces deux tiges que s'accumulent les différentes charges électriques fournies par les différents éléments. Mais à cause de leur mouvement excentrique, qui empêcherait de recueillir d'une manière facile l'électricité, ces tiges aboutissent à deux anneaux isolés fixés sur l'axe de rotation du moteur. Deux frotteurs isolés, appuyant sur ces anneaux, se trouvent alors en rapport constant avec la source électrique, et constituent en quelque sorte les pôles de cette espèce de pile d'électricité statique.

En disposant les intervalles séparant les plaques circulaires de chaque élément, de manière à être en retrait les uns sur les autres, on peut rendre le dégagement électrique tout à fait continu.

M. Girarbon a songé à utiliser les effets mécaniques que pouvait provoquer le courant électrique produit par son appareil à l'entretien de la marche de celui-ci; mais je ne parlerai pas des moyens qu'il a proposés dans ce but, car il m'est impossible de croire à la découverte du mouvement perpétuel.

VIII

INSTRUMENTS D'EXPÉRIMENTATION.

Les instruments dont nous allons parler dans ce chapitre ne constituent pas, à proprement parler, par eux-mêmes des applications électriques ; mais comme ils représentent l'*outillage indispensable* de tous ceux qui appliquent l'électricité ou qui font des recherches sur cet agent physique, je ne pouvais les omettre dans cette première partie de mon ouvrage réservée aux notions technologiques.

Cette catégorie d'instruments peut se diviser en quatre classes : 1° les électroscopes et les électromètres ; 2° les boussoles et les rhéomètres ; 3° les galvanomètres ; 4° les rhéostats.

ÉLECTROSCOPES ET ÉLECTROMÈTRES.

Les électroscopes et les électromètres ont été imaginés dans le but d'accuser la présence de l'électricité sur les corps et d'en mesurer l'intensité ou plutôt la tension.

Electroscopes. — Les électroscopes sont spécialement employés pour révéler la présence de faibles quantités d'électricité et en constater la nature. Ils sont tous fondés sur la répulsion qui s'exerce entre deux corps chargés d'une même électricité. Les plus simples sont les électroscopes à boules de sureau et à feuilles d'or, que nous avons représentés fig. 1 et 2, pl. VIII. L'électroscope à balles de sureau, fig. 1, se compose d'une cloche de verre à fond métallique dans laquelle sont suspendus deux pendules à fils conducteurs qui communiquent avec le bouton *b*. La cloche est vernie jusqu'à une certaine distance du bouton, pour empêcher les pertes d'électricité.

Lorsqu'on présente un corps électrisé à une certaine distance au-dessus de l'électroscope, les balles divergent; elles sont électrisées par influence. En effet, elles retombent à l'état naturel aussitôt qu'on éloigne le corps.

Pour charger l'électroscope, on pose le doigt sur le bouton en même temps que l'on approche le corps électrisé : alors le fluide repoussé s'écoule dans le sol, tandis que le fluide attiré est retenu sur le bouton, et les balles restent en repos. On ôte le doigt, les balles restent encore immobiles; mais à mesure qu'on éloigne le corps électrisé, on les voit diverger de plus en plus, parce que le fluide attiré, devenant libre peu à peu, se répand sur les fils et sur les balles qui se repoussent ainsi l'une l'autre. Cette fois, elles divergent par le fluide attiré, c'est-à-dire par le fluide contraire au fluide du corps électrisé qui a exercé son influence. Si l'on rapproche, en effet, le corps électrisé, les balles se rapprochent puis elles se remettent en repos; mais si on l'approche davantage, elles divergent de nouveau. Cette nouvelle divergence est alors produite par de l'électricité de nom contraire, parce que le corps exerçant une influence plus grande décompose une portion des fluides naturels plus grande que la première fois, et maintenant il faut bien que le fluide repoussé arrive aux balles, c'est-à-dire au point le plus éloigné.

Un électroscope chargé d'une électricité connue et en état de divergence, est l'instrument le plus délicat et le plus commode pour reconnaître l'espèce d'électricité que possède un corps. En effet, si ce corps augmente la divergence, il possède la même électricité que l'électroscope; s'il la diminue, il peut posséder une électricité contraire; mais cela n'est pas sûr, car un corps conducteur pris à l'état naturel exercerait une action semblable; ses fluides étant décomposés par l'électroscope, le fluide attiré attire à son tour celui de l'électroscope et l'appelle dans le bouton, ce

qui diminue la divergence. C'est pourquoi il est bon d'avoir l'un près de l'autre deux électroscopes, l'un qui a été chargé d'électricité vitrée, avec un bâton de résine, l'autre chargé d'électricité résineuse, avec un tube de verre.

Pour éviter cette double opération MM. Fabre et Kunemann ont imaginé, dernièrement, un petit appareil très-simple qui est d'une telle sensibilité qu'on peut l'impressionner avec une source électrique, même très-faible, à plus d'un mètre de distance. Ce petit appareil consiste dans une petite feuille de gutta-percha très-mince (du genre de celle qu'on emploie pour remplacer le papier de Chine dans les impressions lithographiques) que l'on suspend à un support quelconque, et que l'on électrise avant l'expérience, en la frottant légèrement avec le doigt. Cette feuille se trouvant ainsi électrisée résineusement, est attirée ou repoussée, suivant qu'on lui présente un corps électrisé positivement ou négativement.

L'électroscope à feuilles d'or, fig. 2, réagit comme l'électroscope à balles de sureau; seulement il est beaucoup plus sensible, parce qu'une très-faible charge suffit pour donner aux feuilles d'or une grande divergence. Les deux petites boules de métal que l'on voit dans la cloche produisent un double effet: elles favorisent la divergence résultant de faibles charges, et elles empêchent que les feuilles d'or, repoussées trop loin, n'aillent se coller au verre de la cloche.

On peut augmenter la sensibilité des électroscopes à feuilles d'or en adaptant à la tige qui supporte les feuilles d'or un condensateur. Ce condensateur est monté sur une douille qui, au lieu de reposer immédiatement sur la cloche de l'électroscope, doit être fixée à une tige de cuivre passant dans un tube de verre recouvert de plusieurs couches de vernis à la gomme laque. C'est ce tube de verre qui est solidement fixé à la cloche. Le condensateur lui-même se compose de deux plateaux métalliques recouverts d'une

légère couche de vernis à la gomme laque ; l'un de ces plateaux, le supérieur, est mobile, et à cet effet il est muni d'un manche isolant.

Pour charger le condensateur on met en place le plateau supérieur ; on le fait communiquer avec la source électrique, tandis que le plateau inférieur est mis en communication avec le sol ; alors l'électricité de la source, après s'être répandue dans le plateau supérieur, agit par influence au travers de la double couche de vernis, décompose les électricités naturelles du plateau inférieur, attire celle de nom contraire et repousse dans le sol celle du même nom. Il suffit d'un instant pour que la charge soit complète. Cela fait, on supprime d'abord la communication avec le sol, ensuite la communication avec la source ; puis on enlève le plateau supérieur et l'on reconnaît la présence de l'électricité par la divergence des feuilles d'or. Quant à son espèce, elle se détermine en présentant de loin un tube de verre électrisé ou un bâton de résine, de manière à augmenter la divergence.

Bohnemberger, en disposant autrement l'électroscope condensateur dont nous venons de parler, est parvenu à lui donner une sensibilité encore plus grande. Cette disposition consiste à n'employer qu'une feuille d'or et à faire usage de piles sèches qui, comme nous le savons, sont toujours chargées d'une faible quantité d'électricité. Ces piles sèches sont placées sous la cloche de l'appareil, dans une position verticale, les pôles contraires, c'est-à-dire les extrémités chargées d'électricités contraires, en regard ; elles peuvent se rapprocher ou s'éloigner de la feuille d'or à l'aide de deux écrous fixés sur le plateau. Aussitôt que la feuille d'or a reçu, par le moyen indiqué précédemment, sa charge électrique, elle est attirée par le pôle de la pile sèche qui possède l'électricité contraire, et repoussée par l'autre ; ces deux actions s'ajoutent, et cette feuille est alors d'autant

plus attirée que la somme d'action est plus considérable.

En général, il ne faut employer, pour les électroscopes condensateurs, que des plateaux en métal doré ou en verre recouvert de feuilles d'or ; sans cette précaution, les réactions chimiques qui ont lieu entre les doigts humides et les métaux altérables, peuvent induire en erreur.

Electromètres. — Les électromètres ne sont pas seulement comme les électroscopes, des appareils propres à révéler la présence de l'électricité sur les corps, mais ils doivent encore indiquer, par des mesures comparatives, la quantité d'électricité qui s'y trouve développée. Or, comme les différentes charges d'électricité peuvent varier dans de très-grandes proportions, on a dû combiner différemment ces instruments, de manière à ce qu'ils pussent mesurer de très-fortes charges ou des quantités très-minimes d'électricité. En conséquence, les électromètres peuvent être divisés en deux classes : les électromètres sensibles et les électromètres à fortes charges.

Les électromètres sensibles, en général, ne sont autre chose que des électroscopes gradués à l'aide de tables destinées à comparer les intensités électriques. Aussi, la plupart des électroscopes que nous venons de décrire, l'électroscope à feuilles d'or, celui à balles de sureau, gradués au moyen de tables de comparaison, permettent-ils d'atteindre ce but. Le procédé de graduation le plus simple, suivant MM. Becquerel, consiste à avoir deux appareils identiques ; on électrise un des deux de manière à produire, par exemple, une déviation de 20 degrés ; l'autre appareil étant à l'état naturel, on met en contact les deux armatures ; comme ils sont identiques, l'électricité se répartit également sur chacun d'eux ; la déviation diminue et devient, par exemple, 8°. On conclut de là que, si la charge qui donnait 20° est représentée par 1, celle qui comprend à 8° est représentée par $\frac{1}{2}$. On peut continuer ainsi à dédoubler l'élec-

tricité, et, en s'y prenant à plusieurs reprises, avec des intensités électriques différentes, on forme une table dans laquelle les déviations de la partie mobile de l'appareil sont en regard des intensités électriques correspondantes.

Balance de Torsion de Coulomb. — La balance de torsion dont Coulomb s'est servi pour déterminer les lois d'attraction et de répulsion électrique, est un électromètre d'une grande précision, dont on peut même varier la sensibilité, suivant la force de torsion du fil employé, pourvu toutefois qu'on ne dépasse pas la limite d'élasticité du fil.

Cet appareil se compose d'une aiguille de gomme laque, terminée, d'un côté, par un disque de clinquant et suspendue à un fil d'argent, après avoir été parfaitement équilibrée. Ce fil d'argent très-fin est enroulé sur un treuil, adapté à l'extrémité d'une colonne de verre, qui surmonte la cage où est placée l'aiguille. Cette colonne de verre, d'ailleurs, complètement analogue à celle qui est représentée fig. 9, est munie, à sa partie supérieure, d'un cercle gradué, sur lequel peut se mouvoir un index à Vernier, porté par le support du treuil, sur lequel est enroulé le fil d'argent. Par ce moyen, on peut déterminer avec précision les différentes positions de ce treuil.

A l'intérieur de la cage de verre descend, à portée du disque de clinquant, une tige de verre terminée par une petite boule métallique. C'est cette boule qui se trouve mise en communication avec la source électrique dont on veut mesurer l'intensité. Enfin, la cage de verre, elle-même, dans laquelle est renfermé l'appareil, porte, collée sur sa surface cylindrique, une échelle divisée, analogue à celle représentée fig. 3.

L'emploi de la balance de Coulomb repose sur ce principe que la force de torsion est exactement proportionnelle à l'angle de torsion. Il en résulte que la force électrique

qui sera équilibrée par la torsion croissante d'un fil, pourra être mesurée par l'angle de torsion de ce fil. Si donc on électrise la boule fixe placée à l'intérieur de la cage, alors que le disque de clinquant sera en contact avec elle, la répulsion qui s'exercera entre ces deux corps, chargés d'une même électricité, aura pour effet de faire décrire au disque de l'aiguille un certain arc de cercle qui représentera la valeur de la répulsion électrique, puisque cet arc correspond à l'angle dont le fil a dû être tordu pour équilibrer cette force répulsive; toutefois, comme cette torsion du fil ne serait pas alors assez considérable pour que la loi dont nous avons parlé fût applicable, et comme d'ailleurs les indications fournies par l'échelle collée sur la cage de verre ne seraient pas rigoureuses, il est essentiel de faire la contre-partie de l'expérience, c'est-à-dire de tourner le treuil sur lui-même, jusqu'à ce que le disque repoussé soit revenu en contact de la sphère fixe, alors l'arc décrit par l'index du treuil indique la force réelle de la torsion correspondant à la force électrique, et par suite la valeur de cette force elle-même. C'est par ce moyen que Coulomb est parvenu à démontrer que les répulsions, comme les attractions électriques, sont en raison inverse du carré des distances.

Quand on emploie la balance de Coulomb pour la vérification des lois des attractions et répulsions électriques, il est indispensable que les deux corps qui subissent les effets de l'électrisation, soient de même forme et de mêmes dimensions, afin que les charges électriques soient sensiblement égales, sans cela il y aurait des effets d'influence qui pourraient masquer la loi générale.

Balance bi-filaire de M. Harris. — M. Harris, pour remédier à l'inconvénient de l'emploi dans la balance de torsion d'un fil de métal dont l'élasticité n'est jamais parfaite, a construit un appareil, nommé balance bi-

filaire, à cause de deux fils de suspension dont on fait usage au lieu d'un seul. La forme extérieure de l'appareil est à peu près la même que celle de la balance de torsion, mais la force de réaction de l'instrument ne provient plus d'aucun principe d'élasticité, mais bien de l'action de la pesanteur.

En effet, lorsqu'une aiguille horizontale est suspendue à deux fils de soie non tordus, placés parallèlement l'un à l'autre à égale distance d'un axe imaginaire (qui représenterait le fil de suspension, si on n'en employait qu'un), elle est dans sa position d'équilibre, quand elle est horizontale dans le plan vertical, passant par les deux fils. Mais si on tourne l'aiguille, les lignes de suspension dévient de la verticale, et leur distance de l'axe imaginaire devient moindre; l'on a ainsi une force de réaction provenant du poids de l'aiguille qui tend à rappeler, suivant la verticale, les deux fils écartés. D'après cela, si l'on fait osciller l'aiguille, et qu'on observe les effets produits, on peut déterminer, au moyen des formules relatives aux corps oscillants, la nature de la force qui produit les oscillations.

Electromètre de Peltier. — L'électromètre de Peltier est un des instruments les plus sensibles que l'on puisse employer dans les expériences, et en raison de cette qualité, il est choisi de préférence pour les observations électriques atmosphériques. Depuis longtemps il est mis en usage dans plusieurs observatoires météorologiques, particulièrement à l'observatoire de Bruxelles.

Dans cet électromètre la force antagoniste à la répulsion électrique est l'action magnétique d'un très-petit barreau aimanté; par conséquent elle peut être rendue aussi faible qu'on peut le désirer, et comme elle croît et décroît avec l'angle d'écartement du méridien magnétique dans un rapport connu, il est facile d'obtenir avec cet appareil des mesures comparatives. La fig. 3 représente

un électromètre de ce genre, construit par M. Loiseau. *c* est une boule creuse en cuivre, de 1 décimètre de diamètre; elle surmonte une tige de même métal *d*, terminée à sa partie inférieure par une boule plus petite *e*, ayant 2 centimètres de diamètre environ. De cette dernière boule, isolée de la cage de verre *mm* par un bourrelet de gomme laque, descend une tige de cuivre, qui se bifurque et forme une espèce d'anneau *f*. Au centre de cet anneau se trouve, portée sur une pointe, une petite aiguille en cuivre très-moblie *aa'*, qui forme la partie essentielle de l'instrument. Quand l'électromètre est dans son état naturel, l'aiguille *aa'* est ramenée dans la direction du méridien magnétique par une aiguille aimantée beaucoup plus petite, qui lui est parallèle et se trouve attachée au-dessus de sa chape. Une autre aiguille en cuivre *bb'*, plus forte que l'aiguille mobile *aa'*, forme système avec la tige *f*, qui descend dans un tube de verre rempli de gomme laque et encastré dans la tablette de bois *nn*, en sorte que tout l'appareil *cdefab* se trouve isolé, et ne peut transmettre en aucune façon son électricité ni à la cage de verre *mm*, ni à la tablette *nn*. Cet isolement doit être établi avec le plus grand soin. La tablette *nn*, qui sert de support à l'instrument, est portée sur trois pieds ou vis qui permettent de la rendre horizontale.

Pour mettre l'instrument en expérience, il faut le placer de manière que l'aiguille fixe *bb'* soit dans la direction du méridien magnétique, déterminé par les actions simultanées du globe et des ferrailles qui sont dans les environs. Dans cette position, l'aiguille mobile *aa'*, dirigée par sa petite aiguille aimantée, vient se placer parallèlement à *bb'*. Si maintenant on tient au-dessus de la boule *c* un corps électrisé vitreusement ou positivement, il décompose par influence l'électricité de cette boule et de toute la partie *cdefab*. A la partie supérieure de la boule, l'électricité né-

gative est paralysée par l'électricité positive qui se trouve en sa présence; tandis que, dans la partie inférieure de l'instrument, l'électricité positive libre fait diverger la petite aiguille aa' de la position qu'elle avait d'abord, et son angle d'écartement avec l'aiguille fixe bb' sera d'autant plus grand que l'électricité libre sera plus considérable. L'angle d'écartement se lit au moyen de deux cercles gradués, dont l'un est collé sur la tablette nn , et l'autre sur le disque supérieur de la cage de verre mm . Ces deux cadrans se contrôlent et empêchent la parallaxe dans les lectures.

Si, pendant que la boule c est influencée par l'électricité extérieure, on touche le bouton e , on enlèvera l'électricité libre de la partie inférieure de l'instrument, que nous supposons ici positive, et l'aiguille aa' se replacera dans le méridien magnétique. Qu'on retire, aussitôt après, le corps qui agissait par influence et paralysait l'électricité négative au sommet de la boule, cette électricité redeviendra libre, et la petite aiguille aa' , qui s'était replacée parallèlement à bb' , va diverger de nouveau.

Maintenant, voici comme on opère; j'emprunterai les paroles de M. Peltier. « Lorsque je veux interroger la tension électrique recueillie dans l'atmosphère, je monte sur la terrasse, je place l'instrument sur une tablette élevée de 1 mètre 50 centimètres, je l'équilibre en touchant la tige dans la partie la plus inférieure, puis je redescends, et je place l'instrument sur la tablette qui lui est destinée: tout cela se fait avec une grande rapidité, et ne demande pas huit secondes. Lorsqu'on équilibre l'instrument, il faut élever le bras le moins possible, car si on l'élevait assez pour toucher au globe, la main, devenant résineuse par influence, repousserait l'électricité *résineuse* de la boule; elle y neutraliserait la portion vitrée qu'elle y attirerait, et l'instrument serait chargé *résineusement* au moment de

l'éloignement de la main. Il faut donc toucher la tige le plus bas possible, et même avec un corps fin, comme un fil métallique, pour éviter l'influence de la masse de la main sur le reste de la tige. Étant équilibré pendant son élévation, l'instrument, en se baissant, donne des signes d'électricité *résineuse*, tandis qu'en le levant, il en donnerait de *vitrés*; c'est ce que nous avons démontré plus haut. Lorsqu'on opère ainsi, il faut donc se rappeler ce changement de signe, pour ne pas donner une électricité contraire à l'atmosphère. On notera une tension *vitree* lorsque l'électromètre donnera un signe *résineux* en descendant. De même on indiquera une tension *résineuse* à l'atmosphère, si l'instrument descendu dans le cabinet donne un signe zéro ¹. »

« Quand on veut faire usage de l'électromètre de Peltier, dit M. Quetelet dans ses instructions sur l'électricité atmosphériques, il faut remarquer avant tout que les degrés ne sont pas directement comparables entre eux : pour passer du 60° au 61° degré par exemple, il faut beaucoup plus d'électricité que pour passer du 20° au 21° degré; et, en général, pour passer d'un degré au suivant, il faut d'autant plus d'électricité que l'angle d'écartement de l'aiguille indicatrice est plus considérable. Il convient donc de dresser préalablement *une table des degrés équivalents*, c'est-à-dire une table qui fasse connaître, pour chaque degré de l'électromètre, le nombre des degrés correspondants, estimés au moyen de la balance de Coulomb. Ainsi, pour l'électromètre que j'emploie, un angle d'écartement de 12 degrés est représenté par 16 degrés sur la balance de Coulomb; et un angle d'écartement de 23 degrés est représenté par 60 degrés sur la même balance.

« *Moyen de rendre les électromètres comparables entre eux.*

(1) *Recherches sur les phénomènes électriques*, etc., p. 19.

— « Quand on a construit avec soin une *table des degrés équivalents*, il est facile ensuite d'en faire la vérification; il est également facile de faire une table nouvelle pour un second électromètre, et d'établir une correspondance entre les deux tables, de manière que les indications des deux instruments deviennent comparables entre elles.

« Il faut employer à cet effet la méthode de de Saussure, qui consiste à opérer le partage de l'électricité.

« Ainsi, j'ai pris deux électromètres, surmontés chacun d'une boule métallique d'un décimètre de diamètre : j'ai commencé par charger le premier électromètre de manière que l'aiguille indiquât $75^{\circ},5$; puis les deux boules ont été mises en contact pour opérer le partage de l'électricité. Après cette première opération, l'électromètre n'indiquait plus que 70° . Ces valeurs, d'après ma table, correspondaient à 2825 et 1400 degrés de la balance de torsion, et elles se trouvaient, en effet, à peu près exactement dans le rapport de 2 est à 1.

« Après avoir déchargé le second électromètre, je l'ai remis en contact avec le premier, qui, cette fois, n'a plus marqué que 64° degrés, ou bien 795 degrés de la table des équivalents; ce qui donne un peu plus de la moitié du nombre 1400.

« J'ai fait ainsi sept contacts successifs; le tableau suivant montre, dans la seconde colonne, quels en ont été les résultats. Les deux colonnes suivantes contiennent les résultats de deux autres séries d'observations analogues; la quatrième colonne fait connaître les moyennes des nombres observés; la cinquième renferme les nombres calculés, en admettant comme exacte une table des équivalents que M. Peltier avait eu l'obligeance de construire pour mon instrument, et en partant des nombres de la dernière colonne, qui précèdent par progression géométrique dont la raison est $1/2$, comme le veut la théorie.

	SÉRIES D'OBSERVATIONS.			MOYENNES des trois séries.	NOMBRES calculés.	NOMBRES correspondants de la table.
	1re.	2e.	3e.			
Charge primitive.	74e5	75e05	75e	75e	74,5	2825
Après le 1er contact. . . .	70	74	70,5	70,5	70,0	1442
— 2e —	64	66	64,5	64,8	64,0	766
— 3e —	54	57	53	53,7	54,0	353
— 4e —	40	44	40	40,3	41,0	476
— 5e —	28	26	29	27,7	29,0	88
— 6e —	18	17	17	17,3	20,5	44
— 7e —	10	10	12	10,7	14,0	22

« On reconnaîtra que, pour des observations aussi délicates, les résultats des épreuves sont généralement très-satisfaisants. La perte d'électricité pendant les épreuves, malgré toutes les précautions prises, s'est fait sentir un peu vers la fin de chacune des séries d'observations.

« Pendant les opérations, on construit, pour le second électromètre, une table analogue à celle qui vient d'être indiquée, et qui permet, en toute circonstance, de comparer ensuite les résultats obtenus par cet instrument aux résultats indiqués par l'autre.

« Le même mode d'expérimentation a l'avantage de pouvoir servir aussi à déterminer à quels degrés de l'électromètre correspondent les écartements successifs des feuilles d'or d'un électroscope. Après chaque contact, en effet, l'électromètre et l'électroscope, en les supposant surmontés tous deux d'une boule d'égal diamètre, doivent être chargés de la même quantité d'électricité, et accuser, en conséquence, des degrés équivalents. On conçoit cependant que ces comparaisons ne peuvent se faire avec succès que dans le cas où la charge électrique n'est pas trop forte et ne projette pas les feuilles d'or contre les parois de l'électroscope.

« Une table des équivalents, construite pour un électroscope en suivant ces procédés, présente de grands avantages, quand on veut explorer d'une manière continue les effets du passage des nuages au-dessus de l'instrument; on peut évaluer immédiatement les forces électriques comme si elles avaient été appréciées au moyen de l'électromètre. L'observateur n'a pas à se déplacer; il peut se borner à suivre la marche de son instrument. »

Electromètre de Melloni. — Dernièrement M. Melloni a fait construire un électromètre d'une sensibilité extrême, qu'il a décrit lui-même de la manière suivante dans une note envoyée à ce sujet à l'Académie des sciences, en décembre 1854.

« On sait qu'un conducteur à l'état naturel, dit M. Melloni, rapproché d'un autre conducteur électrisé, dissimule une portion de cet état électrique, et, rendant peu à peu au fluide dissimulé sa tension positive à mesure que le fluide sensible s'en va par suite de la dispersion, prolonge la durée de la charge électrique. On sait, d'autre part, que cet effet dérive de l'électricité contraire développée par induction dans la partie plus voisine du corps introduit, et que l'électricité homologue à celle du corps inducteur apparaît dans les portions les plus éloignées, où elle se répand en proportions d'autant plus grandes que les rayons de courbure sont moindres.

« Une heureuse combinaison de ces trois données m'a fait concevoir la possibilité de construire un électroscope éminemment sensible et capable de se maintenir électrisé dans l'un ou l'autre sens beaucoup plus longtemps que tous les appareils connus du même genre. L'effet a parfaitement répondu à mon attente; et comme il me paraît évident que cet instrument nouveau deviendra fort utile dans plusieurs sortes de recherches électriques, je vais tâcher de le décrire avec tous les détails convenables.

« Imaginez une petite tasse métallique A, fig. 4, pl. VIII, munie de deux longs appendices filiformes DD, soudés en deux points opposés du bord supérieur et communiquant, par un conducteur qui passe dans l'axe d'un tube de verre, avec une boule ou un disque en métal E.

« Imaginez, en outre, une seconde tasse métallique renversée B, un peu plus petite et beaucoup plus légère que la précédente, attachée au-dessous d'un fil ou levier très-mince de métal GG, suspendu par son milieu à un fil de soie F.

« Supposez enfin les axes des deux tasses dans la même verticale et le fil de suspension porté à une telle hauteur, que la seconde se trouve entièrement contenue dans l'intérieur de la première, et puisse tourner librement autour de son point de suspension, sans que le contact s'établisse entre ses propres parois et celles de la tasse fixe A¹.

« Les choses étant ainsi disposées, on comprend que si le conducteur E vient à recevoir une charge électrique, elle se propagera par transmission à la tasse extérieure A, et que de là elle agira par induction sur la tasse intérieure B. Supposons, pour fixer les idées, que l'électricité communiquée soit positive.

« Cette force électrique répandue en A troublera l'équilibre du fluide naturel de B, repoussera le principe positif, attirera le négatif, qui réagira à son tour sur le fluide libre de A, en dissimulera une certaine quantité et abandonnera enfin le reste aux lois connues de la distribution électrique sur les conducteurs isolés : en sorte que l'intensité de l'action dépendra de la courbure des surfaces et sera moins forte

1. Dans l'électroscope qui a été construit, il y a une particularité dont on ne fait pas mention dans la description, c'est-à-dire que du milieu intérieur de la tasse fixe s'élève un petit cylindre métallique *f*, lequel, quand la tasse mobile a été bien équilibrée, s'y trouve dans l'intérieur sans la toucher.

sur les parois de la tasse que sur les appendices. La tasse extérieure A de l'appareil chargé contiendra donc une certaine proportion d'électricité positive dissimulée, c'est-à-dire accumulée sans tension et sans mobilité, et ses appendices DD posséderont une électricité libre de même nature, d'autant plus énergique que l'on approchera davantage de leurs extrémités.

« Quant à la masse intérieure B et son levier CC, il y aura de l'électricité négative dissimulée à la partie centrale placée en regard de la tasse A, et de l'électricité positive libre sur le reste du système mobile, c'est-à-dire sur la sommité plate de la tasse renversée et sur son levier supérieur. Or cette dernière espèce d'électricité sera évidemment beaucoup plus énergique aux extrémités du levier que dans sa partie moyenne et au sommet de la tasse : 1° parce que ces extrémités constituent les points les plus éloignés de l'action inductive ; 2° parce que leur rayon de courbure est plus petit que partout ailleurs.

« Ainsi le levier CC possédant la même espèce d'électricité que les appendices DD, et étant par sa position concentrique soumis à l'action conspirante de leur force répulsive, sera énergiquement repoussé s'il ne se trouve pas précisément dans le même azimut qu'elles, et après quelques oscillations il s'arrêtera à un certain angle de déviation. Alors la charge électrique communiquée au système fixe EADD commencera à diminuer.

« Mais cette diminution sera beaucoup plus lente que dans les électroscopes ordinaires, à cause de l'électricité dissimulée qui se dégagera peu à peu de la partie centrale et viendra remplacer, sur la tasse A, ses appendices DD, le fil de communication et le disque E, une partie de l'électricité libre perdue par l'effet de la dispersion. L'électrisation double ou inductive du système mobile ACC suivra exactement les phases successives de l'électrisation simple

du système fixe, ses deux principes se recomposent graduellement en proportion des pertes de la charge, et, après un certain temps, tout rentrera dans l'état naturel. Tout ce que nous venons de dire est indépendant du mode employé pour charger le conducteur E, et peut en conséquence s'appliquer également au cas de la charge directe du contact et au cas de la charge indirecte ou contraire, obtenue au moyen de l'induction.

« En résumé, la partie mobile de l'instrument s'électrise toujours par induction et jamais par communication; la différence de forme entre le centre et les extrémités des pièces fixes et mobiles rend la distribution des forces motrices la plus avantageuse possible pour la rotation de l'index, et l'action inductive des surfaces centrales dissimulant une portion d'électricité pour lui rendre peu à peu l'état libre au fur et à mesure des pertes subies, prolonge la durée de la charge reçue. Si l'on a bien saisi le sens de ces notions préliminaires, on comprendra tout de suite la condition qu'il faut satisfaire dans la construction de l'appareil et la manière de l'employer.

« Et d'abord la minceur des pièces qui constituent la partie essentielle de l'instrument, contribuant à accélérer les pertes de l'électricité dans le milieu ambiant, il est nécessaire de les renfermer dans une cage où l'air se maintienne fort sec moyennant une substance avide d'humidité. La sécheresse de l'air intérieur est surtout indispensable pour que la torsion du fil de soie qui supporte la tasse renversée ne varie point, et que l'index CC puisse revenir constamment dans le même azimut, lorsque les appendices DD ont perdu leur charge électrique.

« Il faut ensuite que la cage ait une forme convenable. Et comme les observations à faire exigent la connaissance des angles de déviation formés par deux barreaux superposés sans contact, et maintenus à distance d'un cadran

inférieurement placé, la disposition la plus favorable au but est évidemment de suspendre l'extrémité libre du fil de soie au sommet intérieur d'un tube vertical aboutissant au centre d'un disque horizontal de verre, dont la circonférence repose sur un récipient cylindrique, tant soit peu plus grand que le levier mobile et les appendices sous-jacents de la tasse fixe. Les bords supérieurs de ce récipient doivent être aplatis, garnis de peau, afin d'intercepter la communication entre l'air intérieur et l'air extérieur, lorsqu'ils sont serrés au moyen de petites vis de pression contre le cercle métallique qui encadrera le disque de verre.

« Le cercle divisé qui mesure les angles formés par la répulsion de l'index sera percé au centre pour livrer un libre passage à la tasse fixe A, et cette tasse sera continuée par un tube de verre verni, dont l'intérieur contiendra le fil de communication avec l'extérieur. Ce fil isolé se recourbera deux fois à angle droit dans le même plan vertical pour reprendre sa direction primitive, et aboutir à la pièce extérieure de métal destinée à l'introduction de la charge électrique.

« L'espace inférieur au cadran devra recevoir, moyennant des ouvertures à vis pratiquées sur le fond du récipient cylindrique, un ou deux réservoirs remplis de chlorure de calcium.

« Le fond de ce récipient s'appuiera sur un trépied, muni de vis qui serviront à placer le fil de suspension dans l'axe de l'appareil.

« Enfin la nécessité de transporter l'instrument d'un lieu à l'autre et de donner au levier mobile un certain angle initial de déviation exigera à l'extrémité supérieure du tube, qui renferme le fil de soie, deux sortes de mouvements : le premier, de simple translation verticale, pour faire poser la tasse renversée intérieure sur le fond plat de la tasse droite extérieure, et la remonter ensuite à la hau-

teur convenable ; le second, de rotation horizontale, pour placer, au commencement de chaque série d'expériences, le levier indicateur à une petite distance angulaire des appendices fixes. Le mouvement de rotation se communiquera au système mobile en vertu de la force de torsion de la soie.

« Comme c'est en vertu de cette même force de torsion qu'est due la résistance qui fait équilibre à l'action électrique et arrête le levier et la tasse électrisée par induction à une distance angulaire plus ou moins grande, il faut en proportionner la valeur à celle de la masse tournante. Voilà pourquoi, au lieu d'un seul fil de cocon, il sera utile d'en prendre plusieurs réunis, non pas tordus à la manivelle, mais simplement collés ensemble par l'action de leur propre substance gommeuse et de l'eau chaude, tels qu'ils sortent enfin du premier appareil de la filature.

« Au reste, si l'on trouve la force de torsion du fil de soie trop faible, et qu'on veuille abréger le temps des observations, il n'y aura qu'à poser parallèlement à la direction de l'index une petite aiguille aimantée sur la tasse mobile, comme on le fait pour l'indicateur de l'électroscope de Peltier, et à placer les appendices de la tasse fixe dans une direction qui forme un angle de 4 à 5 degrés avec le méridien magnétique.

« Mais il ne faut pas oublier qu'alors on perdra en sensibilité ce que l'on gagnera du côté de la promptitude des observations, à peu près comme cela arrive en mécanique dans le cas où il s'agit de soulever un poids à une certaine hauteur, avec une force appliquée directement ou rendue plus efficace par le moyen des moufles, du treuil ou de toute autre machine, car on ne peut augmenter la vitesse qu'aux dépens de la force, ou *vice versa*.

« Le secours de l'aiguille aimantée pourra toutefois être utile dans plusieurs circonstances, et surtout lorsque la trop

grande humidité de l'air enlève rapidement l'électricité à la partie extérieure de l'instrument. »

Inductomètre de M. Th. Du Moncel. — Cet appareil, qui est destiné à mesurer des charges électriques un peu considérables, est fondé comme son nom l'indique sur les effets qu'exerce par influence, à des distances différentes, un corps électrisé. Il consiste dans un fil métallique recouvert de gutta-percha AB (fig. 5) long d'environ 40 centimètres, fixé sur un support mobile A, et terminé d'un côté par une pointe B, de l'autre par une boule métallique C. Du côté de la pointe ce fil est maintenu horizontalement en ligne droite, tandis que du côté de la boule C il se trouve à portée d'une sphère métallique D, fixée sur le support lui-même, et dont il n'est séparé que par un intervalle d'un demi-millimètre. Le support, avec tout l'appareil qu'il porte, est mobile sur une règle graduée GH, et en communication avec le réservoir commun.

Pour faire fonctionner cet appareil, il suffit d'exposer la pointe du fil AB devant le corps électrique dont on veut mesurer la charge ; il se détermine alors, entre les deux boules, une étincelle qui ne disparaît que quand on a suffisamment éloigné l'appareil du conducteur électrisé. Cet éloignement, comme on le comprend aisément, doit être d'autant plus grand que la force inductrice est plus grande, en sorte que l'on peut estimer, par le rapport calculé des distances indiquées sur la règle graduée, le rapport des forces inductrices que l'on mesure.

La longueur minimum de 40 centimètres donnée à la partie du fil qui est recouverte de gutta-percha, est indispensable à cause de l'influence qui serait exercée sur les autres parties de l'appareil, notamment sur la boule D, et qui empêcherait sa sensibilité.

J'ai cherché, au moyen de cet appareil, à apprécier la répartition de la force électrique sur les conducteurs d'une

machine électrique. La machine sur laquelle j'ai expérimenté était de petites dimensions et ne fournissait que des étincelles de 5 à 6 centimètres de longueur. J'ai trouvé les indications suivantes sur mon inductomètre : 34 centimètres pour la force inductrice des mâchoires ; 49 centimètres pour celle du milieu des conducteurs ; 46 pour les bouts opposés aux mâchoires, et 59 pour la traverse unissant les deux conducteurs. En remplaçant la sphère D par un petit électroscope à feuille d'or dont le bouton supérieur serait mis en contact avec la boule C, ce qui peut être fait facilement au moyen d'un système commun de suspension adapté au support de la sphère D, on rendrait l'appareil beaucoup plus sensible. Il faudrait alors éloigner le système mobile jusqu'à l'entière disparition de tous signes électriques. Les électroscopes à feuilles d'or, surmontés d'une tige pointue, sont fondés sur le même principe électrique, seulement le mode d'appréciation de la tension électrique qu'ils constatent se rapporte à celui des électromètres ordinaires.

Electromètre de Lane. — L'électromètre de Lane sert à d'autres usages que les appareils précédents. Il permet de communiquer une charge déterminée à un corps conducteur. Il consiste dans une bouteille de Leyde isolée sur un plateau, et dont la garniture intérieure communique avec une boule. Une autre boule de même dimension que la précédente, et placée à l'extrémité d'une tige de cuivre en croix sur une colonne du même métal, communique avec la garniture extérieure. Cette dernière boule, par l'intermédiaire de la tige qui la supporte, peut être mise en contact ou à une distance déterminée de la première. En chargeant la bouteille comme à l'ordinaire, il éclate entre les deux boules de l'appareil une série d'étincelles dont le nombre indique le degré de charge que l'on communique au corps conducteur que l'on électrise. On peut encore apprécier cette charge au moyen d'une seule étincelle, en estimant la distance des deux boules au moment où elle éclate.

GALVANOMÈTRES ET RHÉOMÈTRES.

Nous avons vu, pages 21, 163 et 234, sur quel principe reposent les galvanomètres et les rhéomètres, et comment MM. Sweiger et Pouillet furent conduits à leur construction. Nous allons maintenant étudier dans leurs détails ces instruments qui jouent un rôle si important dans les applications de l'électricité.

Les galvanomètres, comme les électromètres, doivent être variés dans leur construction suivant le degré de sensibilité qu'ils doivent avoir pour les usages auxquels on les destine. On a donné le nom de rhéomètres ou simplement de boussoles aux appareils destinés à accuser et à mesurer l'action de courants électriques assez énergiques, et celui de galvanoscopes, ou plutôt de galvanomètres, à ceux qui servent à indiquer la présence ainsi que l'intensité de courants électriques beaucoup plus faibles.

Boussoles et Rhéomètres. — Si l'on a seulement pour but de s'assurer qu'un courant électrique d'une certaine intensité traverse un circuit, on peut se servir d'une aiguille aimantée portée sur un pivot, ou d'une petite boussole que l'on place sur un ruban de cuivre (faisant partie du circuit) de façon que l'aiguille, dans son orientation N.-S., soit parallèle au conducteur. On vend même des boussoles disposées à cet effet qui sont très-commodes. Mais quand on a besoin d'un appareil accusant des courants moins énergiques, on forme alors un multiplicateur en enroulant un fil recouvert de soie autour d'un cadre en bois, de manière à ce que ce fil se replie 30 ou 40 fois sur lui-même; on suspend au milieu du cadre, à l'aide d'un fil de soie ou sur une pointe, une aiguille aimantée; on adapte au-dessus de cette aiguille une autre aiguille de cuivre, et celle-ci indique, sur un cadran divisé, la plus ou moins grande déviation de l'aiguille aimantée.

Pour éviter le soin d'orienter ces boussoles, M. Loiseau a dernièrement imaginé un système de galvanomètre à orient fixe, dans lequel la force directrice de l'aiguille aimantée, au lieu de dépendre de l'action du magnétisme terrestre, dépend de la position d'un petit barreau aimanté, faisant partie de l'appareil. Comme ce petit barreau est fixé dans le sens même des fils de la boussole, l'aiguille aimantée reste toujours dans une direction convenable pour subir l'effet du courant. Ce petit appareil, qui est maintenant adopté pour toutes les lignes télégraphiques françaises est représenté fig. 6, pl. VIII.

Quand on emploie un fil pour la suspension de l'aiguille aimantée, une ouverture longitudinale doit être ménagée à la partie supérieure du cadre du galvanomètre, ou bien on place l'un à côté de l'autre deux cadres galvanométriques, sur lesquels on distribue les trente ou quarante tours de fil, jugés suffisants pour la sensibilité de l'appareil.

Balance de Torsion galvanométrique. — On peut, à l'aide du principe de la torsion, construire un instrument très-précis, qui donne la mesure de l'intensité d'un courant, ce que ne font pas exactement les boussoles, dont nous venons de parler. Il consiste en un multiplicateur dans lequel on substitue un fil de torsion d'argent ou de laiton non recuit, au fil de soie auquel est suspendue l'aiguille aimantée, et l'on s'assure par les indications d'un cercle gradué, disposé à cet effet, comme nous l'avons dit au sujet de la balance de Coulomb, de combien de degrés il faut tordre le fil métallique pour ramener toujours l'aiguille au zéro de la division du cercle du multiplicateur, ou à sa position première. L'angle de torsion donnera donc immédiatement une quantité proportionnelle à l'intensité du courant électrique et pourra lui servir de mesure.

Boussole des sinus, de M. Pouillet. — Les meilleurs systèmes de Rhéomètres, pour mesurer l'intensité des cou-

rants électriques, sont les boussoles des sinus et des tangentes, dont le principe a été indiqué en 1824, par M. de La Rive, et qui ont reçu de M. Pouillet la forme sous laquelle elles sont adoptées aujourd'hui.

La boussole des sinus se compose, 1° d'un cercle métallique vertical CD, fig. 7, creusé sur sa circonférence d'une gorge assez profonde et coupé à sa partie inférieure par une bande d'ivoire, afin de pouvoir servir au besoin de conducteur simple ou de cadre de multiplicateur, quand on enroule dans sa gorge un fil métallique isolé; 2° d'une aiguille aimantée A, posée sur un pivot au milieu du cercle CD, et qui reçoit l'influence du multiplicateur; 3° d'un cercle divisé MN maintenu dans une position parfaitement horizontale, et dont l'alidade mobile porte le multiplicateur CD et son aiguille. Un système de niveaux et de vis calantes permet d'établir rigoureusement l'horizontalité de ce cercle MN.

Quand on fait usage de cet instrument, le cercle CD doit être placé dans le plan du méridien magnétique; alors l'appareil est au zéro, et l'aiguille aimantée se trouve placée dans le plan même du cercle CD. Mais si on vient à faire passer un courant, soit au travers du cercle de cuivre CD, soit au travers du fil qui s'y trouve enroulé, l'aiguille est déviée jusqu'à ce que la force magnétique qui la sollicite ait équilibré la force directrice du courant. Alors on fait tourner le système CD, au moyen de l'alidade RS qui le porte jusqu'à ce que le cercle CD soit ramené de nouveau dans le plan de l'aiguille. On y parvient à l'aide de lunettes qui permettent de viser sur les extrémités d'une aiguille de cuivre, fixée à angle droit sur l'aiguille aimantée. Dans ce cas l'intensité du courant est proportionnelle au sinus de l'angle mesuré sur le cercle MN par le mouvement de l'alidade.

On comprend facilement que la sensibilité de l'appareil

dépendant uniquement du nombre de circonvolutions du fil conducteur sur le cercle CD, on peut obtenir par l'enroulement de plusieurs fils susceptibles d'être joints ensemble ou disjoints, des instruments applicables à toutes les intensités de courants.

Boussole des tangentes. — La boussole des sinus, combinée comme nous venons de le dire, peut également servir de boussole des tangentes; seulement on doit adapter dans ce cas à la boussole une aiguille très-courte, afin que la distance de ses pôles au conducteur du courant soit sensiblement la même dans toutes les positions. C'est pour cette raison qu'on donne en général un très-grand développement au cercle CD, dans les véritables boussoles des tangentes.

Pour faire usage de ce système de Rhéomètre, on place comme précédemment le cercle vertical CD dans le plan du méridien magnétique. Mais au lieu de le déplacer quand l'aiguille est déviée sous l'influence du courant, on se contente de noter le degré de cette déviation; alors les intensités électriques sont entre elles comme les tangentes des angles de déviation.

En raison de l'exiguité de l'aiguille aimantée dans ces instruments, il devient nécessaire d'employer pour sa suspension des fils sans torsion; l'instrument devient alors beaucoup plus sensible.

Quoi qu'il en soit, l'emploi de la boussole des sinus est de beaucoup préférable à celui de la boussole des tangentes, quand les instruments qu'on a à sa disposition sont de petites dimensions. La lecture des indications en est beaucoup plus facile et les expériences sont beaucoup plus exactes.

On a cherché à remédier aux défauts que présente la boussole des tangentes de petit modèle, par des dispositions particulières, ou des corrections mathématiques.

Mais jusqu'à présent ces moyens n'ont été guère employés. L'un d'eux indiqué par M. Gaugain, et vérifié mathématiquement par M. Bravais, consiste à placer le centre de l'aiguille excentriquement par rapport au cercle vertical, et à une distance du plan de ce cercle égale au quart de son rayon. De cette manière, les intensités électriques sont véritablement proportionnelles aux tangentes des angles de déviation.

Suivant M. Despretz, la correction qu'il faudrait apporter à la formule exprimant la valeur de l'intensité électrique avec la boussole des tangentes, devrait être présentée sous cette forme :

$$i = (1 + 3 \theta^2) \operatorname{tang.} \alpha - \frac{15 \theta^2}{8} \sin. 2 \alpha$$

i étant l'intensité du courant α la déviation, θ le rapport entre la demi-distance des pôles de l'aiguille et le rayon du cercle du courant.

Dans les appareils construits par M. Ruhmkorff, le cadran de la boussole supporté sur un seul pied peut tourner sur lui-même et être réglé à volonté; il porte en outre à son centre un petit cercle épais de cuivre rouge, que l'on approche aussi près que possible de l'aiguille, à l'aide d'une vis de rappel, placée au-dessous. Ce petit cercle est destiné à amortir les oscillations de l'aiguille par suite des réactions d'induction qui se trouvent échangées de part et d'autre. Enfin, les deux fils qui sont enroulés sur le cercle CD aboutissent à des boutons d'attache, fixés sur une lame d'ivoire. On peut de cette manière les réunir facilement en tension ou en quantité.

Boussole des sinus des postes télégraphiques. — Dans les stations télégraphiques françaises on a réduit la boussole des sinus à une espèce de galvanomètre, de la forme représentée fig. 8.

ABC est un cercle gradué, fixe, et placé sur la circonférence d'un disque circulaire en bois; sur la partie intérieure du disque s'engage un plateau circulaire A' B' C' qui peut tourner autour de son centre, et porte un index T, indiquant sur le cercle fixe ABC de combien de degrés, minutes, etc., il a tourné. DE est un cadre en bois, établi perpendiculairement à la surface du plateau mobile et entouré de plusieurs tours de fils isolés. C'est un simple multiplicateur. La chapé avec pierre dure d'une aiguille aimantée *aa* repose sur une pointe très-aigüe, placée au centre du cadran; une autre aiguille neutre, très-légère, en laiton *a'a'*, est fixée perpendiculairement à l'aiguille aimantée. R est un point de repère pour la pointe de l'aiguille en laiton; et pour éviter des oscillations trop grandes de la part de l'aiguille, deux petites chevilles *x* et *y* placées des deux côtés de ce repère, s'opposent à la course de cette aiguille. Ce repère et ces chevilles sont placés sur le plateau mobile, près de la circonférence et sur la perpendiculaire au plan du multiplicateur menée par le centre. Le plateau A' B' C', l'index T, le multiplicateur et le repère liés invariablement, forment un système mobile autour d'un axe vertical, passant par le centre de l'appareil.

L'index T étant sur le zéro de la graduation, on dispose tout le système de manière que le cadre du multiplicateur et le fil qui l'entoure, soient dirigés vers les pôles magnétiques de la terre. Comme l'aiguille aimantée prend elle-même cette direction, on sera arrivé à la position cherchée lorsque la pointe de l'aiguille *aa'* sera sur le point de repère R. Si maintenant on fait passer à travers le multiplicateur un courant, l'aiguille est déviée et elle vient butter contre une des chevilles *x* et *y*; alors on tourne le cercle mobile A' B' C' dans le sens de la déviation, jusqu'à ce que la pointe de l'aiguille *a'a'* se retrouve sur le repère R.

L'angle compris entre les deux positions de l'index mesure la déviation, et son sinus exprimé par le nombre correspondant de la table des sinus donnera l'intensité du courant.

Magnétomètre de Weber. — L'appareil construit par M. Weber, et avec lequel on ne mesure que de très-petites déviations, donne également avec précision l'intensité des courants électriques. C'est une espèce de gros galvanomètre disposé de manière à amplifier tellement les moindres déviations de l'aiguille aimantée, qu'il devient très-facile de les apprécier avec la précision la plus rigoureuse.

Qu'on imagine, suspendu à un fil de soie, sans torsion, long de soixante centimètres environ, le système représenté fig. 9 bis, lequel système est composé 1° d'un miroir étamé à faces parallèles M; 2° d'un barreau aimanté AA' suspendu par un axe tt' à deux crochets FF' placés invariablement dans le plan du miroir M : on comprendra qu'un pareil système adapté à l'appareil, représenté fig. 9, et disposé de manière que le barreau aimanté AA' effectue ses oscillations au milieu du multiplicateur CCCC, constituera un véritable galvanomètre dans lequel les déviations du barreau pourront être estimées par celles d'un rayon de lumière réfléchi par le miroir M. A cet effet une large ouverture B est pratiquée sur la base de la colonne de verre TB, à l'intérieur de laquelle est renfermé le miroir. A une certaine distance de l'appareil est placée une mire, sur laquelle se trouve tracée une division en millimètres. Enfin, une lunette munie de fils croisés permet d'observer, par réflexion dans le miroir, les divisions de la mire, qui, à chaque mouvement du miroir, viennent se placer successivement dans l'axe optique de la lunette. Comme la distance de la mire au miroir est connue, et que cette distance est d'ailleurs variable au gré de l'observateur, suivant le degré d'approximation qu'il désire obtenir, rien

ne devient plus facile que d'apprécier la valeur des plus petites déviations du barreau aimanté, dues à l'influence du multiplicateur.

Le fil de suspension du barreau aimanté est attaché au treuil T d'un micromètre, pareil à celui de la balance de Coulomb, et qui permet de constater le degré de torsion du fil, quand on veut se servir de cet appareil, comme balance de torsion galvanométrique ou de magnétomètre pour la mesure du magnétisme terrestre. Le cadre du multiplicateur, dont la forme, comme on le voit sur la figure, est celle d'un cylindre elliptique, est construit en cuivre rouge d'une assez grande épaisseur (15 millimètres environ), pour que l'action inductrice de ce métal, amortisse rapidement les oscillations du barreau, qui pourraient être très-longues sans cette précaution. Enfin, les fils de cuivre recouverts de soie, que l'on distingue en K, et qui constituent le multiplicateur, viennent aboutir à des boutons d'attache, fixés sur une plaque d'ivoire RR. En *mn* se trouve une petite portion de cadran divisé (10 à 15 degrés), pour les observations très-approximatives et pour placer le barreau à zéro.

Tout le système est mobile pour l'orientation sur un plateau horizontal, supporté par trois pieds, munis de vis calantes.

On pourrait croire qu'en raison de la dimension considérable du barreau aimanté AA', par rapport au cadre galvanométrique CCCC, la proportionnalité des intensités électriques aux tangentes des angles de déviation, constatée par cet appareil, ne devrait pas exister. Mais il n'en est pas ainsi à cause de la brièveté des mouvements accomplis par le barreau aimanté qui ne ressort jamais du cadre galvanométrique. Cet instrument n'est donc en réalité qu'une boussole des tangentes dans laquelle la petitesse des déviations du barreau réalise les conditions de dispo-

sition des boussoles de tangentes ordinaires, et dans laquelle l'amplitude considérable donnée à ces petites déviations, par le miroir M, supplée aux écarts plus marqués de l'aiguille aimantée dans ces mêmes boussoles.

Dynamomètre électrique de Weber. — Cet instrument, qui a une grande analogie avec le magnétomètre dont nous venons de parler, a été établi par M. Weber, dans le but spécial de mesurer avec précision l'action mutuelle des solénoïdes ou des aimants dynamiques. Toutefois, il pourrait, sous certaines conditions, être encore appliqué à la mesure de l'intensité des courants.

Qu'on imagine, substituée au barreau aimanté de l'instrument précédent, une bobine enroulée d'une certaine quantité de fil, et disposée de manière que le plan des spires de l'hélice ainsi constituée, soit perpendiculaire à celui des spires du multiplicateur, qui sera alors cylindrique. Qu'on suppose le miroir M du magnétomètre transporté en M, fig. 10, sur l'axe de suspension de la bobine mobile, et on aura une idée du dynamomètre électrique de M. Weber. Pour en comprendre le jeu, il faut savoir que les deux extrémités du fil de la bobine mobile aboutissent à deux petits fils d'argent, très-fins, qui constituent son système de suspension, et qui sont destinés en même temps à lui transmettre le courant par l'intermédiaire de deux supports métalliques auxquels ils sont attachés par leur extrémité supérieure. L'arrangement des conducteurs permet de mettre également dans le circuit le fil du multiplicateur fixe, sans que le plus léger frottement vienne troubler le mouvement de la bobine.

Les deux fils de suspension servent encore à mesurer la force avec laquelle les deux solénoïdes agissent l'un sur l'autre, attendu que chaque fois que la bobine mobile se déplace d'un certain angle, il se produit un mouvement de rotation proportionnel au sinus de cet angle. C'est à

l'aide du miroir M que la valeur de cet angle peut être appréciée, et cette appréciation est faite comme nous l'avons indiqué précédemment.

La partie supérieure de l'appareil porte une poulie à suspension libre B, à laquelle sont fixées les extrémités des fils d'argent portant la bobine mobile. Cette poulie peut être abaissée ou élevée, au moyen d'une vis à écrou pour que la bobine soit placée dans la position la plus convenable par rapport au multiplicateur. Comme l'action qu'exercent les deux fils d'argent en leur point d'attache est égale, puisque le poids de la bobine qu'ils soutiennent est uniformément réparti entre eux, la poulie B, bien que mobile autour d'un point central, se tient en équilibre.

Des glaces recouvrent les cinq faces de l'appareil, pour éviter les effets de l'agitation de l'air et des boutons d'attache, mis en rapport avec le multiplicateur et les galets métalliques, contre lesquels les fils d'argent frottent avant de se fixer sur la poulie B, permettent d'établir entre les deux solénoïdes une continuité métallique, propre à la circulation d'un même courant. C'est à l'aide de cet instrument que Weber a pu démontrer : 1° que la force électrodynamique, produite par l'action réciproque de deux fils conducteurs, qui transmettent des courants d'égale intensité, est proportionnelle au carré de cette intensité; 2° que les lois qui régissent les actions électro-dynamiques sont les mêmes que celles qui régissent les actions magnétiques à distance, principes admis par Ampère, mais qui n'avaient pas été prouvés d'une manière définitive par l'expérience avant M. Weber.

Balance électro-magnétique de M. Becquerel. — « On peut employer avantageusement, dans la comparaison des courants électriques, dit M. Becquerel, la balance électromagnétique, représentée fig. 11, pl. VIII. Cet appareil donne en poids l'intensité du courant électrique; cette intensité

étant proportionnelle aux poids placés dans un des plateaux des balances.

« La balance d'essai doit trébucher à moins d'un milligramme; à chacune des extrémités du fléau FF' on suspend à une petite tige verticale un plateau PP' ; au-dessous de chaque plateau est fixé à un fil de soie un barreau aimanté AA' . Ces deux barreaux aimantés à saturation, tournent leur pôle boréal en bas. On prend ensuite deux tubes creux en verre, d'un diamètre assez grand pour que les barreaux puissent y entrer sans toucher les parois; on enroule autour de chacun de ces tubes un fil de cuivre recouvert de soie, de manière à former une hélice de plusieurs milliers de circonvolutions. Ces deux tubes sont fixés verticalement sur des plateaux horizontaux en cuivre CC $C'C'$ mobiles dans deux directions perpendiculaires entre elles au moyen de deux vis de rappel VV' , afin de pouvoir les centrer par rapport à l'axe des barreaux. Si l'on fait passer un courant à travers le fil d'une des hélices, suivant sa direction, le barreau aimanté s'élèvera ou s'abaissera, et fera participer le fléau à ce mouvement. Si on dirige ensuite le courant dans le fil de la seconde hélice, de telle sorte que le mouvement du fléau s'exécute dans le même sens, et qu'on fasse communiquer ensemble les deux hélices, les deux actions s'ajouteront; l'appareil acquiert alors une grande sensibilité, et indique le passage d'un faible courant dans tout le circuit. Nous allons donner une application de ce mode d'expérimentation. On a pris une lame de zinc et une lame de cuivre présentant chacune une surface de quatre centimètres carrés. Après les avoir mises en communication avec les deux extrémités libres des deux hélices, on les a plongées dans 10 grammes d'eau, auxquels on avait ajouté une seule goutte d'acide sulfurique. Les plateaux ont trébuché, et il a fallu 0.0355 pour maintenir l'équilibre. En opérant avec de l'eau distillée, on

n'a employé que 0^{re},0025; d'où il résulte que l'intensité du premier courant est à celle du second dans le rapport de 355 à 25, ou comme 14: 1. Cet appareil peut également servir à mesurer les courants électriques de faible intensité. »

Multiplicateur à hélices de M. Becquerel. — En donnant une autre position aux hélices et aux barreaux, on transforme la balance précédente en un multiplicateur d'une grande sensibilité. Au lieu de placer les hélices dans le sens vertical, on les met horizontalement, et l'on substitue deux aiguilles aimantées aux deux barreaux. Ces deux aiguilles sont fixées chacune perpendiculairement à l'une des extrémités d'une tige très-mince de métal, que l'on suspend horizontalement par son milieu à un simple fil de cocon, pour donner une grande sensibilité à l'appareil.

Les pôles des deux aiguilles étant placés inversement, on peut disposer le système de manière à ne lui laisser qu'une force directrice extrêmement faible, condition indispensable pour que l'appareil soit très-sensible. Dans leur position d'équilibre, les deux aiguilles auxquelles on donne la courbure de l'arc de la circonférence décrite par l'extrémité de la tige, pénètrent chacune jusqu'à leur point de jonction avec la tige horizontale dans l'intérieur des hélices. Le courant doit être dirigé de telle manière que l'action qu'il exerce sur chaque aiguille chasse celle-ci hors de son hélice : l'attraction se trouve ainsi doublée.

Les deux hélices, d'ailleurs, sont montées sur des supports qui peuvent se régler, de sorte qu'on a toutes les facilités pour les bien centrer par rapport aux aiguilles.

Le cercle divisé sur lequel sont fournies les indications en rapport avec la force répulsive exercée sur les aiguilles, est placé dans le prolongement de la traverse qui les supporte, de sorte que c'est une pointe portée par cette traverse elle-même qui sert d'indicateur.

Thermo-Galvanomètre de M. Reiss. — Cet instrument,

spécialement affecté à la mesure de la puissance calorifique des courants, se compose d'un thermomètre à air ABCD, fig. 12, sur lequel réagit une spirale très-fine de platine EF mise en rapport avec le courant. Ce thermomètre à air peut être rendu plus ou moins sensible par l'inclinaison plus ou moins grande de son support, inclinaison que l'on assure au moyen d'une vis de pression adaptée à l'arc GH. Le liquide destiné à servir d'index est versé par le tube CD. C'est ordinairement de l'acide sulfurique coloré étendu avec de l'alcool. Il forme un bouchon mobile que l'air de la boule déplace en se dilatant. Cette boule, comme on le voit sur la figure, porte trois boutons métalliques I, J, K, dont deux servent de boutons d'attache aux rhéophores du circuit; le troisième est destiné à renouveler l'air dans le thermomètre après chaque expérience.

L'effet produit par le courant dans ce thermomètre est facile à comprendre puisque, sous l'influence de ce courant, le fil de platine IJ s'échauffe, et en dilatant l'air emprisonné dans la boule, provoque l'abaissement du liquide indicateur. On apprécie alors la valeur de cet abaissement à l'aide d'une échelle graduée et au moyen d'une formule fondée sur les lois de la chaleur; on en déduit l'échauffement du fil de platine lui-même.

C'est au moyen de cet instrument que M. Reiss a pu reconnaître que l'élévation de la température qu'éprouve un fil métallique placé dans le circuit de la décharge d'une batterie, est proportionnelle au carré de la quantité d'électricité accumulée dans la batterie, divisé par l'étendue de cette batterie.

Au besoin, le thermomètre électrique de M. Reiss pourrait être appliqué à la mesure de l'intensité des courants un peu énergiques; mais pour être comparables, les indications fournies par cet instrument devraient être transformées selon les formules indiquées par M. Reiss.

Boussole de MM. Fabre et Kunemann. — Pour obtenir une boussole galvanométrique d'une sensibilité variable et susceptible de mesurer de très-forts courants, MM. Fabre et Kunemann ont eu l'idée de rendre mobile l'un des points d'attache du circuit avec la boussole. Ce point d'attache, qui est constitué par une simple pince munie d'un point de repère, peut être fixé en différents points du cercle gradué de la boussole; de cette manière, le courant principal qui traverse ce cercle peut se trouver de plus en plus éloigné de l'axe de l'aiguille aimantée, et par conséquent doit l'impressionner de moins en moins. Si on établit, par des expériences préalables, une relation entre les indications fournies par l'aiguille aimantée, suivant les positions différentes du point d'attache mobile du circuit, on pourra avoir des mesures comparatives pour chaque degré de sensibilité que l'on donnera à l'appareil.

GALVANOMÈTRES.

Galvanomètre de Nobili. — Quand il s'agit de constater la présence de très-faibles courants électriques, les instruments dont nous venons de parler ne présenteraient pas une sensibilité assez grande, car l'action directrice exercée par le magnétisme terrestre sur les aiguilles ou barreaux aimantés qui les constituent exige, pour être vaincue, une force déjà assez énergique. Dans ce cas on est obligé d'avoir recours à des instruments plus délicats, et ce sont ces instruments que l'on désigne plus spécialement sous le nom de *galvanomètres*.

Pour amoindrir la résistance apportée à l'action du courant par le magnétisme terrestre, M. Nobili a imaginé de substituer à la simple aiguille aimantée des boussoles un système appelé *astatique* composé de deux aiguilles placées parallèlement l'une au-dessous de l'autre, et disposées de manière à présenter des pôles inverses d'un même côté.

Avec un pareil système, en effet, l'action du globe s'exerçant d'une manière opposée sur les deux aiguilles se trouve à peu près détruite, et le serait complètement si les aiguilles étaient identiquement dans les mêmes conditions; ce qui ne peut avoir lieu. Du reste, la faible action directrice qui se trouve alors exercée peut être utilisée à ramener toujours le système astatique au repère.

Pour rendre le courant électrique susceptible d'exercer, sur un pareil système, un effet efficace, il a suffi à M. Nobili de placer ce système de manière que l'une des aiguilles fût à l'intérieur du cadre du multiplicateur et la seconde au-dessus. Avec cette disposition, en effet, les réactions du multiplicateur devaient s'exercer sur les deux aiguilles dans le même sens, et le système compensateur se trouvait, par cela même, ajouter encore à la sensibilité de l'appareil. Tel est le principe du galvanomètre de Nobili, instrument parfait qui a déjà révélé bien des phénomènes électriques dont on ne soupçonnait pas l'existence.

La fig. 13 représente un galvanomètre de ce genre. AB est le multiplicateur dont les deux bouts du fil aboutissent aux deux boutons d'attache FF'. Ce multiplicateur est fixé sur une planche circulaire, qui, dans certains appareils, peut tourner sur elle-même, au moyen d'un engrenage, afin d'orienter facilement le système astatique. AMH est un support de cuivre auquel est suspendu par un fil de cocon VL le système astatique; L est le cadran indicateur des déviations, R le cylindre de verre qui enveloppe l'appareil. Enfin, les trois vis V V' V'' servent à mettre l'appareil de niveau et à centrer l'aiguille.

La longueur et la grosseur du fil, enroulé sur le multiplicateur, doit dépendre du degré de sensibilité que l'on veut donner à l'appareil, et de la nature de la source électrique que l'on veut apprécier. Pour les courants dont la source électrique présente très-peu de résistance intérieure,

tels que les courants des piles thermo-électriques, il faut que le fil du galvanomètre soit un peu gros et court. Pour les courants, produits par une source électrique dont la résistance intérieure est considérable, il faut au contraire que le fil du multiplicateur soit long et fin. Comme ce dernier cas est le plus ordinaire, il vaut en général mieux avoir un galvanomètre à fil fin, ou mieux encore, un galvanomètre à plusieurs fils, afin qu'on puisse, suivant les cas, les réunir en tension ou en quantité. On a construit des galvanomètres qui ont jusqu'à trente mille tours de fil enroulé sur le multiplicateur. Mais en général, les bons galvanomètres doivent en avoir au moins deux ou trois mille.

Quand on veut se servir de ces appareils, pour étudier les effets des décharges électriques, ou les courants d'induction de l'appareil de Ruhmkorff, il est nécessaire d'isoler les fils, non-seulement avec de la soie, mais encore en les enduisant de vernis à la gomme laque.

Galvanomètre différentiel de M. Becquerel. — Dans beaucoup de circonstances il est nécessaire de former une table des intensités qui donne le rapport entre la déviation de l'aiguille aimantée et l'intensité du courant qui l'a produite. On peut s'y prendre de plusieurs manières. Le procédé le plus facile et le plus exact consiste, d'après MM. Becquerel, à construire le galvanomètre, de façon que deux fils conducteurs, de même longueur, soient enroulés parallèlement l'un à l'autre. On a alors un galvanomètre à deux fils, à travers lequel on peut lancer deux courants différents. Si ces courants sont de même intensité et marchent dans ces fils en sens contraire l'un de l'autre, aucune indication n'est produite par le galvanomètre. Mais, si au contraire, ces deux courants vont dans le même sens, la déviation de cet instrument est doublée. En faisant varier l'intensité du courant qui passe dans chaque fil,

on aura une série d'observations qui permettront de former une table des intensités électriques. En général, quand on ne dépasse pas 20° , on peut considérer les déviations du galvanomètre comme sensiblement proportionnelles aux intensités du courant électrique qui passe.

Il est facile, comme on le comprend aisément, de déterminer le sens du courant qui affecte un galvanomètre, quand on sait le sens dans lequel le fil est enroulé sur son cadre, et qu'on connaît la position des pôles de l'une des aiguilles magnétiques. Il suffit pour cela de supposer, comme l'a conseillé Ampère, un personnage couché sur le dos, dans le circuit, et de considérer si le pôle sud de l'aiguille aimantée, dévie à sa gauche ou à sa droite. Si ce pôle est dévié à sa gauche, le courant doit lui entrer par les pieds et lui ressortir par la tête; si le contraire a lieu, le courant est dirigé dans un sens inverse. Mais il est plus court et plus commode d'obtenir cette détermination par une expérience directe, en faisant communiquer l'une des extrémités du fil de l'instrument avec une petite lame de zinc, et l'autre avec une petite lame de cuivre ou de platine; on plonge ces deux lames dans l'eau, puis on note le sens dans lequel dévie l'aiguille supérieure, en se rappelant que le courant qui opère cette déviation va du cuivre au zinc, à travers le fil du galvanomètre; telle sera également la direction de tout courant qui opérera une déviation dans le même sens, tandis que tout courant qui en opérera une en sens contraire, aura une direction opposée.

Une précaution très-importante que l'on doit prendre à l'égard de tous les galvanomètres en général, c'est de ne pas agir sur eux avec un courant trop fort pour l'instrument, car l'action d'un semblable courant risque de modifier le magnétisme des aiguilles, soit en en diminuant l'intensité, soit même en le renversant. On altère aussi beaucoup la sensibilité du galvanomètre, et on risque plus

tard de faire erreur, soit sur la force, soit sur le sens des courants qu'on veut apprécier. Il est donc important d'avoir à sa disposition un certain nombre de galvanomètres de divers degrés de sensibilité, afin de se servir de l'un ou de l'autre, suivant les cas.

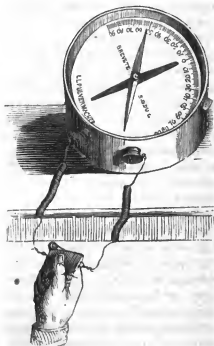
Malgré cette précaution, il arrive encore que l'axe magnétique de l'aiguille du galvanomètre se trouve quelque peu dérangé par l'action d'un courant électrique, même très-faible quand cette action est longtemps prolongée. C'est pourquoi, il est essentiel de ne pas maintenir trop longtemps un galvanomètre en action.

Il est encore d'autres causes d'irrégularités dans les indications du galvanomètre qui tiennent à des réactions échangées entre le cuivre du fil galvanométrique et les aiguilles aimantées. Ces réactions tendent à créer pour le système astatique deux positions d'équilibre à gauche et à droite du zéro du cadran qui empêchent souvent l'aiguille indicatrice de se maintenir au point de repère. Mais, en employant dans la construction de ces instruments des métaux très-purs on peut éviter en partie ce défaut.

Galvanomètre sensible de M. Dubois Reymond. — Pour détruire complètement l'effet des réactions échangées entre le fil de cuivre et le système astatique des galvanomètres, réactions que nous venons de signaler, et rendre le système astatique lui-même plus sensible, M. Dubois Reymond place dans le voisinage du zéro de la division du cadran de son galvanomètre, un fragment aimanté d'aiguille à coudre, long de $1^{\text{mm}}\frac{1}{2}$ seulement, et diminue le magnétisme de la plus forte des deux aiguilles du système astatique, jusqu'à ce que ce système se place perpendiculairement au plan du méridien magnétique, position dans laquelle l'instrument acquiert son maximum de sensibilité. Comme le petit fragment d'aiguille à coudre ne réagit que quand l'aiguille indicatrice est très-près du zéro, il ne fait que

compenser l'effet des causes perturbatrices, sans troubler la sensibilité de l'appareil au delà des points où cette compensation n'est plus nécessaire.

Galvanomètre portatif de Ruhmkorff. — M. Ruhmkorff a cherché à rendre portatif le galvanomètre de Nobili, en suspendant le système astatique sur un pivot. Ce petit instrument dont la figure ci-dessous représente l'aspect exté-



rieur, est assez sensible pour ses dimensions et le peu de fil qui compose le multiplicateur. Il est très-commode dans la pratique, et son bon marché (12 fr.), le rend accessible à toutes les bourses.

PROCÉDÉS GALVANOMÉTRIQUES DIVERS.

« Quand les courants sont très-forts, dit M. de La Rive, on peut, pour les mesurer, se contenter de les faire passer successivement à travers un long conducteur vertical et de faire osciller, toujours à la même distance, une aiguille d'épreuve. On a dans le nombre des oscillations exécutées dans un temps donné, une mesure exacte de la force du courant, d'après la formule du pendule. On peut aussi, surtout lorsqu'il s'agit d'apprécier les intensités relatives des décharges électriques ou des courants instantanés, se servir de l'aimantation de petites aiguilles, opérée par ces décharges, en ayant soin de prendre ces aiguilles aussi semblables que possible. On détermine ensuite le degré d'aimantation que les aiguilles ont acquis, en comptant le nombre des oscillations que fait chacune d'elles sous l'influence du magnétisme terrestre. Nous ne nous étendrons pas sur ces moyens de mesurer qui sont des procédés et non des instruments. Ces procédés présentent toutefois un avantage sur ceux qui servent de base à la construction des galvanomètres, c'est d'être indépendants de la force magnétique des aiguilles ou des barreaux. Cette force peut varier sans qu'on s'en doute, et cependant on la regarde comme constante. Le meilleur appareil serait donc celui dans lequel il n'y aurait d'autre force mise en jeu que celle du courant lui-même qu'on veut mesurer, et peut-être aussi la force magnétique du globe terrestre qu'on peut aussi, sans erreur sensible, regarder comme constante dans le même lieu. Ainsi, un galvanomètre multiplicateur, dans lequel, au lieu d'aiguille aimantée, on aurait un petit barreau de fer doux qu'aimanterait le courant lui-même, qui le ferait dévier, pourrait être utilement employé. Il est vrai qu'il serait moins sensible que le galvanomètre ordinaire. On pourrait également, dans la balance de M. Becquerel, se servir de barreaux de fer

doux, au lieu de barreaux aimantés. Dans ce cas, il ne faudrait employer qu'un bassin, et on mesurerait, par des poids nécessaires pour lui faire équilibre, la force avec laquelle le bassin (au-dessous duquel serait fixée la tige de fer doux) tendrait à baisser, en vertu de l'attraction, que le courant, transmis à travers l'hélice, exerce sur le fer doux. Enfin, on peut mesurer l'intensité d'un courant au moyen de la flexion, plus ou moins considérable, exercée sur une lame de fer doux, par le courant qu'on ferait passer à travers le fil d'une bobine prismatique, dans l'intérieur de laquelle serait placée la lame.

« Le plus grand obstacle que présente la mise en œuvre de ces différents procédés, consiste dans la difficulté qu'on éprouve à trouver du fer assez pur pour perdre la totalité du magnétisme, qu'a développé chez lui l'action d'un courant, quand ce courant vient à cesser. Aussi, l'appareil qui remplirait le mieux toutes les conditions, s'il était suffisamment sensible, serait celui dont Weber s'est servi pour mesurer l'action mutuelle de deux solénoïdes, et que nous avons décrit page 439. »

Régulateurs électro-musicaux. — Pour terminer avec les appareils galvanométriques, il me reste à faire la description d'un petit appareil électro-musical, qui peut, jusqu'à un certain point, servir à mesurer, d'une manière très-approximative, sans doute, l'intensité des courants énergiques.

Ce petit appareil, représenté fig. 15, n'est autre chose qu'un rhéotome de de La Rive, dont les ressorts de suspension de l'armature vibrante sont assez forts pour motiver des vibrations très-courtes produisant des sons. Ces vibrations, comme nous l'avons dit page 299, sont d'autant plus rapides que la lame vibrante est plus courte, et que la force électro-magnétique est plus grande, soit par suite du rapprochement de la lame de l'électro-aimant qui le commande, soit par l'effet du renforcement du courant électrique.

Pour rendre les sons ainsi, produits de plus en plus aigus, il ne s'agit donc que d'employer l'un ou l'autre de ces deux moyens. Le plus simple c'est d'avoir une vis que l'on serre et que l'on desserre à volonté, et qui, par cela même, éloigne plus ou moins la lame vibrante de l'électro-aimant. En adaptant à cette vis une aiguille et devant cette aiguille un index, MM. Breton, frères, sont parvenus à marquer sur cet index les divers angles de serrage de cette vis correspondant aux sept notes de la gamme. Si l'on prend pour unité de mesure l'une de ces notes dont on conservera le son à l'aide d'un diapason, on pourra ramener à une même intensité les divers éléments composant une pile, et cela, en les chargeant ou les déchargeant successivement, jusqu'à ce qu'ils produisent individuellement le son voulu. On pourra aussi maintenir à un même degré d'intensité le courant produit par un seul élément de pile, ou une pile entière; car, on sera averti des variations que cette intensité subit par la différence des sons que l'on entendra. Dès lors, au moyen d'un régulateur de courant on pourra renforcer ou affaiblir à temps ce courant, jusqu'à ce qu'on arrive au son servant d'unité de mesure. Enfin, en appréciant, au moyen du sonomètre, le degré d'acuité des sons produits sous des influences électriques différentes, on pourra ramener la comparaison des intensités électriques à celle des nombres de vibrations correspondant aux sons produits.

M. Bourbouze a imaginé, dans le même but, un autre appareil qui est extrêmement sensible, et qui se compose d'une sirène mise en mouvement par un électro-moteur. Plus l'intensité électrique est considérable, plus le moteur marche vite et plus par conséquent les sons produits par la sirène sont aigus. En prenant donc, comme nous l'avons expliqué précédemment, une des notes produites par cet instrument comme unité de mesure, on pourra régler

par rapport à elle les différentes intensités électriques que l'on aura à apprécier.

RHÉOSTATS.

Nous avons vu, page 64 et suivantes, que tous les calculs relatifs aux courants fournis par les piles hydro-électriques se rapportaient à trois données E , R , et I , constituant ce que l'on appelle les constantes des courants voltaïques.

Il était donc important que ces constantes pussent être calculées par rapport aux différentes piles, et nous avons vu que pour cela M. Wheatstone avait imaginé un instrument appelé *Rhéostat*.

Nous allons maintenant parler de cet instrument et des différentes manières de l'appliquer aux calculs des résistances. Pour plus d'exactitude, nous allons laisser parler M. Wheatstone lui-même :

« La méthode que j'ai suivie pour la détermination des constantes dans un circuit rhéophorique, dit M. Wheatstone¹, est essentiellement celle adoptée par Fechner, Lentz, Pouillet, etc., dans leurs vérifications expérimentales de la théorie de Ohm.

« On détermine la résistance d'un circuit en observant la force du courant, d'abord sans aucune résistance additionnelle interposée dans le circuit, puis après avoir ajouté une résistance connue. On a ainsi successivement :

$$F = \frac{E}{R} \quad F' = \frac{E}{R + r}$$

d'où :

$$\frac{F}{F'} = \frac{R + r}{R}$$

équation d'où l'on déduit facilement la valeur de R , toutes

1. Cette traduction du mémoire de M. Wheatstone a été faite par M. l'abbé Moigno, et a été publiée dans son traité de télégraphie électrique.

les autres quantités qui y entrent étant connues; on a en effet

$$R = \frac{F'}{F - F'} r.$$

« La force électro-motrice d'un circuit s'obtient en multipliant la force du courant par la résistance totale, car de l'équation :

$$F = \frac{E}{R}, \text{ on tire } E = FR.$$

« Le principe de cette méthode est extrêmement simple; mais la difficulté de déterminer immédiatement la force d'un courant au moyen du galvanomètre est un obstacle à son emploi général. Fechner mesurait la force du courant par le nombre d'oscillations de l'aiguille placée à angle droit avec la direction des circonvolutions du fil, opération très-fastidieuse; d'autres ont employé les déviations de l'aiguille, les degrés correspondants de force ayant été préalablement déterminés par quelque procédé particulier, ou déduits de quelque règle dépendant de la construction particulière de l'instrument. Une autre objection contre l'emploi d'un galvanomètre pour mesurer la force d'un courant naît des changements qui ont souvent lieu dans l'intensité magnétique de l'aiguille, surtout lorsqu'elle a été soumise à l'action d'un courant trop fort.

« Le principe de ma méthode consiste à employer, au lieu de résistances constantes, des résistances variables, ramenant par là à l'égalité les courants dans les circuits comparés, et concluant du total de la résistance introduite ou supprimée pour passer d'une déviation de l'aiguille à une autre les valeurs des forces électro-motrices et des résistances du circuit, selon les conditions particulières de l'expérience. Cette méthode n'exige aucune connaissance des forces correspondantes aux différentes déviations de l'aiguille.

« Pour appliquer ce principe, il est nécessaire d'avoir un moyen de varier la résistance interposée, de manière qu'elle change graduellement dans des limites voulues quelconques. Pour y parvenir, j'ai inventé deux instruments : l'un destiné aux circuits dont la résistance est considérable, l'autre pour ceux dans lesquels elle se trouve faible.

Rhéostat. « Le premier instrument est représenté fig. 14, pl. VIII ; G est un cylindre de bois, H un cylindre de laiton, tous deux du même diamètre et ayant leurs axes parallèles. Sur le cylindre de bois est entaillée une rainure en hélice, et à l'une de ses extrémités est fixé un anneau de cuivre auquel est attaché l'un des bouts d'un long fil métallique d'un très-petit diamètre. Ce fil, lorsqu'il est enroulé autour du cylindre de bois, remplit toute la rainure, et est fixé par son autre bout à l'extrémité opposée du cylindre de cuivre. Deux ressorts, J et K, pressant l'un contre l'anneau de cuivre du cylindre de bois, l'autre contre l'extrémité du cylindre de cuivre H, au moyen de deux vis de jonction, peuvent être mis en communication avec les fils métalliques du circuit. La manivelle mobile M sert à faire tourner les cylindres sur leurs axes. Lorsqu'elle est placée sur le cylindre H et tournée de gauche à droite, le fil métallique se déroule de dessus le cylindre de bois et s'enroule sur le cylindre de cuivre ; mais lorsqu'on l'adapte au cylindre G, et qu'on la tourne de droite à gauche, le contraire a lieu. Les circonvolutions sur le cylindre de bois étant isolées et tenues séparées l'une de l'autre par la rainure, le courant suit la longueur entière du fil enroulé sur ce cylindre ; mais les circonvolutions sur le cylindre de cuivre n'étant pas isolées, le courant passe immédiatement du point du fil en contact avec le cylindre au ressort K. La partie efficace de la longueur du fil métallique se réduit donc à la portion variable enroulée sur le cylindre de bois.

« Dans l'instrument que j'emploie ordinairement, les cy-

lindres ont six pouces anglais de longueur et un pouce et demi de diamètre ; le filet de la vis est de $1/40$ de pouce, et le fil, qui est de laiton, a $1/100$ de pouce de diamètre. Je fais usage d'un fil très-mince et d'un métal mauvais conducteur, afin de pouvoir introduire une plus grande résistance dans le circuit.

« Une échelle permet de mesurer le nombre de circonvolutions déroulées et l'on obtient les fractions de circonvolution au moyen d'un index fixé à l'axe de l'un des cylindres, lequel index parcourt les divisions d'un cercle gradué.

« Comme le principal usage de cet instrument est d'ajuster ou régler le circuit de manière à obtenir un degré de force constant, je lui ai donné le nom de *rhéostat*.

« *Emploi et modifications diverses du rhéostat.*— Le rhéostat que j'emploie pour des circuits dans lesquels la résistance est comparativement faible, se compose d'un cylindre de bois bien sec, sur la surface duquel une rainure est creusée en hélice ; un gros fil de cuivre est enroulé autour du cylindre, occupant la rainure et formant comme le filet d'une vis. Immédiatement au-dessus du cylindre, et parallèlement à son axe, est placée une barre triangulaire, portant un curseur ; à ce curseur est adapté un ressort qui presse constamment contre les spires du fil de cuivre. L'un des bouts de l'hélice métallique est attaché à un anneau de laiton, contre lequel presse un ressort qui est en communication, au moyen d'une vis de jonction, avec l'une des extrémités du circuit ; l'autre extrémité du circuit est retenue, par une vis semblable, en contact métallique avec la barre triangulaire de métal. En tournant la manivelle, le cylindre se meut sur son axe dans l'une ou l'autre direction, et le curseur, guidé par le fil de cuivre, glisse le long de la barre, avançant ou reculant suivant que le cylindre tourne à droite ou à gauche : le curseur venant à se mettre en contact avec un point différent du fil de cuivre, une résistance

différente est introduite dans le circuit; elle est due à la seule portion de fil comprise entre le curseur et le bout mis en communication avec le ressort. Le cylindre de l'instrument que j'ai construit a dix pouces et demi anglais de longueur, trois pouces un quart de diamètre; le fil fait cent huit circonvolutions autour du cylindre. Les dimensions de l'instrument, la grosseur, la longueur et la matière du fil métallique doivent varier avec la résistance variable qu'on désire introduire dans le circuit et le degré d'exactitude avec lequel on veut mesurer ces variations.

« Le rhéostat, particulièrement, sous la dernière forme que nous venons de décrire, peut être, comme on l'a vu p. 345, employé comme régulateur d'un courant électrique; pour le maintenir exactement avec le même degré de force pendant un temps quelconque voulu, pour en augmenter ou en diminuer la force dans toute proportion donnée. Interposé dans le circuit d'une machine thermo-électrique, il permet, quelques variations qu'éprouve le rhéomoteur dans son énergie, de conserver constamment au courant la même intensité en tournant le cylindre du régulateur à gauche ou à droite, suivant qu'elle augmente ou diminue. On peut de même, en ajustant convenablement le rhéostat, obtenir toute autre intensité comprise entre des limites données. Puisque la consommation des matières employées pour une pile voltaïque dans laquelle il n'existe point d'action locale est inversement proportionnelle à la résistance du circuit, cette méthode d'altérer l'intensité a un avantage que ne possède aucune autre : la force effective est toujours strictement proportionnelle à la quantité de matières dépensées pour produire la puissance. Ce résultat serait très-avantageux si de nouveaux perfectionnements parvenaient jamais à transformer une machine électro-magnétique en moteur mécanique.

« Dans les opérations de l'électrotypie, l'avantage du

rhéostat est évident. En variant sa position de temps en temps de manière à tenir l'aiguille d'un galvanomètre sur le même point, on peut maintenir un courant au degré d'énergie voulu, pendant un temps quelconque ; et, comme la nature du dépôt, lorsque la solution dont on l'obtient reste la même, ne varie qu'avec la force du courant et la grandeur de la surface sur laquelle le métal est réduit, lorsqu'on a une fois obtenu un bon effet, on peut, sans difficulté et avec certitude, se replacer dans les mêmes circonstances et éliminer complètement les chances du hasard.

Unité de mesure de la résistance. « Il est de la plus haute importance d'avoir, pour mesurer les résistances, un terme de comparaison exact et que l'on puisse aisément reproduire. On pourrait se servir, pour cet effet, d'un fil de cuivre d'une longueur et d'un diamètre donnés ; mais, comme de très-petites différences de diamètre sont accompagnées de différences considérables dans les résistances des fils métalliques, il convient mieux de prendre pour unité de résistance un fil métallique d'une longueur et d'un poids donnés, ce qui permet de déterminer très-exactement de faibles différences. Je prends donc, dans toutes mes expériences, pour unité de résistance, un fil de cuivre de un pied anglais de long ¹, et pesant cent grains (*poids anglais*). Le diamètre de ce fil est les 0,071 d'un pouce anglais, et il est compris entre les numéros quinze et seize du commerce de Londres.

Bobines de résistance. « Il est souvent nécessaire de mesurer des résistances beaucoup trop grandes pour qu'on puisse y parvenir au moyen du rhéostat, quoique la longueur réduite de son fil métallique soit considérable : je puis, par exemple, désirer connaître la résistance du fil des électro-aimants de mon appareil télégraphique, qui a sou-

1. Le pied anglais vaut 0^m,304, 100 grains valent 5 gr.,9.

vent plusieurs centaines de mètres de longueur, celle que présente une très-longue ligne télégraphique, ou la résistance d'une certaine étendue d'un liquide mauvais conducteur. Dans tous ces cas, et dans une foule d'autres, j'emploie un autre instrument qui me met en état d'interposer dans le circuit des résistances en quantités quelconques, et d'obtenir cependant, par l'adjonction du rhéostat qui lui sert comme de régulateur, qui le complète et le perfectionne, un degré d'exactitude aussi complet qu'on le désire. Cet instrument consiste en six bobines, autour de chacune desquelles s'enroule un fil de cuivre très-fin, recouvert de soie et d'un diamètre de $\frac{1}{200}$ de ponce. Deux de ces fils ont cinquante pieds anglais de long, les autres ont respectivement cent, deux cents, quatre cents, huit cents pieds : les deux bouts de chaque fil sont attachés à des fils métalliques courts, et d'un fort diamètre, fixés aux faces supérieures des cylindres et servant à réunir tous les fils en une longueur continue; ces fils métalliques de gros diamètre continuent les extrémités des fils qui font entrer les bobines dans le circuit. Sur la face supérieure de chaque cylindre est un ressort double de laiton mobile autour d'un centre, de sorte que ses extrémités peuvent à volonté, ou poser sur les bouts des gros fils qui servent à réunir toutes les bobines, ou en être écartées et ne poser que sur le bois. Dans la dernière position, le courant du circuit est obligé de suivre les circonvolutions de la bobine ; mais dans la première position, le courant suit le ressort et soustrait du circuit la résistance entière de la bobine. Quand tous les ressorts posent sur les gros fils métalliques, la résistance de toute la série des bobines est supprimée ; mais il suffit de tourner les ressorts pour introduire tour à tour plusieurs bobines dans le circuit, et augmenter successivement la résistance de tous les multiples de 50 pieds jusqu'à 1600.

« Comme on ne peut pas rigoureusement compter sur la

mesure exacte de ces grandes longueurs de fil métallique, il est bon de constater le nombre d'unités de résistance de chaque fil enroulé, ce qui, à l'aide du rhéostat, peut aisément s'effectuer. J'ai trouvé que la résistance entière de 1600 pieds était équivalente à 218880 unités de résistance, ou à 218880 pieds du fil métallique pris pour terme de comparaison. J'emploie encore une série auxiliaire de fils enroulés et combinés de la même manière que les précédents, consistant en six bobines du même fil métallique, chacune de 500 verges de long : la longueur réduite de cette série a plus de 233 milles du fil pris pour terme de comparaison : en la combinant avec la précédente, je puis mesurer des résistances égales à 274 milles et demi ¹.

Évaluation de la résistance. « Lorsqu'un élément parfaitement constant, un galvanomètre et un rhéostat, sont placés dans un circuit, on peut constater la résistance de tout corps interposé de la manière suivante : observez le point sur lequel se tient l'aiguille ; retirez alors du circuit le corps dont la résistance doit être mesurée, et, au moyen du rhéostat, ajoutez une longueur de fil suffisante pour ramener l'aiguille au même point. Le nombre d'unités de résistance correspondant à cette longueur ajoutée sera la mesure cherchée.

« Il est important de déterminer la résistance du fil métallique du galvanomètre employé dans les expériences ; pour effectuer cette détermination par la méthode ci-dessus, il serait nécessaire d'avoir un galvanomètre auxiliaire ; mais lorsqu'on n'a pas sous la main un second galvanomètre, on peut avoir recours au procédé suivant : prenez deux éléments rhéomoteurs exactement égaux, et pour la force électro-motrice et pour la résistance ; placez-en un dans le

1. La verge anglaise vaut environ 1 mètre français, le mille vaut environ 8/5 de kilomètre.

circuit avec galvanomètre ; observez soigneusement la déviation de l'aiguille ; interposez ensuite l'autre élément, et ramenez l'aiguille au même point par le moyen du rhéostat. La longueur réduite du fil déroulé λ sera la mesure de la résistance g du fil du galvanomètre, plus celle des fils qui établissent la communication r ; retranchez r de λ , la résistance de g sera déterminée : on a, en effet,

$$\frac{E}{R+r+g} = \frac{2E}{2R+r+g+\lambda}$$

d'où

$$g = \lambda - r.$$

Somme des forces électro-motrices d'un circuit voltaïque.

— « Le rhéostat fournit un moyen commode de constater la somme des forces électro-motrices en activité dans un circuit voltaïque, sans avoir besoin pour cela de l'aide d'un rhéomètre gradué qui indique des forces proportionnelles, ou d'avoir recours au procédé fastidieux de compter les oscillations d'une aiguille, employé par Fechner dans ses investigations. Il sera d'une grande importance pour les progrès futurs de l'électro-chimie d'épargner le temps et la peine de cette opération ; d'autant plus que les fluctuations dans les forces électro-motrices de plusieurs circuits, dues à des actions chimiques ou autres, enlèvent toute espèce de valeur à des observations résultant d'expériences qui exigent un temps considérable.

« Le principe sur lequel s'appuie mon procédé est celui-ci : dans deux circuits produisant des effets rhéométriques égaux, la somme des forces électro-motrices divisée par la somme des résistances est une quantité constante, car les équations

$$F = \frac{E}{R}, F' = \frac{E'}{R'}, F' = F,$$

entraînent la suivante : $\frac{E'}{R'} = \frac{E}{R}$.

« Si E et R croissent ou décroissent proportionnellement, F restera évidemment invariable : connaissant donc le rapport des résistances dans deux circuits produisant le même effet, nous sommes en état d'en conclure immédiatement celui des forces électro-motrices. Cependant, comme il est difficile, dans plusieurs cas, de déterminer la résistance totale, se composant des résistances partielles du rhéomoteur, du galvanomètre, du rhéostat, etc., j'ai recours au procédé suivant, qui est très-simple. Si l'on augmente la résistance du premier circuit d'une quantité connue r , la force du

courant devient $\frac{E}{R+r}$:

afin de conserver à l'action du second circuit cette même valeur, il faudra que la résistance ajoutée soit multipliée par le même facteur n qui multiplie les forces électro-motrices et les anciennes résistances, car alors on aura bien

$$\frac{E'}{R+r} = \frac{nE}{nR+nr}$$

« Le rapport n des longueurs des résistances ajoutées r et rn , qui est connu immédiatement, conduit donc à celui des forces électro-motrices.

« Dans l'expérience, je procède ainsi : j'interpose le rhéostat et le galvanomètre dans le circuit, et ensuite, au moyen du premier de ces instruments, en ajoutant, s'il est nécessaire, les bobines de résistance, j'ajoute une résistance suffisante pour amener l'aiguille exactement à 45° ; je constate ensuite la longueur de fil qu'il faut dérouler de dessus le cylindre de laiton du régulateur pour réduire la déviation de l'aiguille à 40° . Le nombre des tours donne la

mesure de la force électro-motrice, en prenant pour unité le nombre correspondant au cas où le rhéomoteur ou élément pris pour terme de comparaison était seul employé. »

Détermination de la résistance des rhéomoteurs. —

M. Wheatstone indique cinq procédés pour la détermination de la résistance des rhéomoteurs ; mais de ces différents procédés nous ne considérerons que le suivant, qui me paraît le plus simple.

« Amenez, continue M. Wheatstone, au moyen du rhéostat, l'aiguille du galvanomètre à un point M déterminé par un nombre m de degrés ; constatez la résistance r nécessaire pour amener l'aiguille à un point antérieur N, ramenez-la en M : alors placez un fil métallique qui partage le courant avec le galvanomètre, et faites varier ce fil jusqu'à ce qu'une nouvelle résistance r' ramène de nouveau l'aiguille en N. Lorsque l'aiguille est en M, on a

$$F = \frac{E}{R + g},$$

lorsqu'elle est fixée sur N, dans le premier cas,

$$F' = \frac{E}{R + g + r};$$

dans le second cas,

$$F' = \frac{Er'}{R(g + r') + gr'};$$

égalant ces deux expressions, on a

$$\frac{E}{R + g + r} = \frac{Er'}{R(g + r') + gr'}.$$

d'où :

$$R = \frac{rr'}{g}.$$

Comme r , r' et g sont connus, R s'obtient tout de suite, et on en déduit la résistance du rhéomoteur.

Si $r' = g$, c'est-à-dire si la résistance du fil du galvanomètre est égale à celle du fil qui détourne une portion du courant, alors $R = r$. »

Instruments pour mesurer la résistance des liquides. — Ces instruments se composent principalement d'un tube de verre d'environ deux pouces anglais de long et d'un demi-pouce de diamètre intérieur, dont une portion a été enlevée sur un pouce un quart de sa longueur, de manière à laisser un segment de 270° ; à l'une des extrémités de cette ouverture est fixé un bouchon de métal terminé par une plaque de platine, à l'autre bout se trouve un piston mobile terminé aussi par une plaque de platine, et pouvant avancer jusqu'à un quart de pouce de la plaque fixe : l'étendue de la course du piston est ainsi limitée à un pouce, et l'on y adapte un appareil micrométrique, afin de mesurer exactement une portion quelconque de cet intervalle. » Pour obtenir la mesure de la résistance d'un liquide, je procède, dit M. Wheatstone, de la manière suivante : j'interpose dans le circuit une petite pile constante, composée d'environ trois éléments, avec le rhéostat, les bobines de résistance, le galvanomètre et le tube. Le bout du piston se trouvant à un quart de pouce de la plaque fixe, je remplis l'espace entre les deux plaques du liquide dont je veux mesurer la résistance. J'ajuste ensuite le rhéostat de manière à amener l'aiguille du galvanomètre sur un point déterminé : ayant noté ce point, je recule le piston, de manière qu'il laisse libre tout l'espace restant de un pouce, et je remplis le vide ainsi formé du même liquide : l'aiguille reculera vers zéro : je diminue alors la résistance du circuit au moyen du rhéostat et des bobines de résistance, jusqu'à ce que l'aiguille s'arrête au point où elle se trouvait, lorsqu'il n'y avait d'interposé qu'un quart de pouce de la colonne liquide : la longueur réduite du fil métallique, ainsi retiré du circuit, sera la mesure de la résistance de un pouce de liquide.

« La mesure de la résistance d'un liquide doit être prise aussitôt qu'il est placé dans le circuit, parce que si on laisse le courant agir sur lui pendant un temps quelconque, la nature de la solution change. Dans le cas de l'acide sulfurique, par exemple, la solution est rendue plus forte par la décomposition et la diminution par conséquent de l'eau, tandis que dans le cas d'un sel métallique, non-seulement l'eau est décomposée, mais le métal est réduit, et l'acide libre dégagé. Néanmoins, dans les conditions de mes expériences, l'action chimique est si lente et le temps de l'opération si court qu'il n'y a lieu à aucun changement sensible de ce genre. »

C'est à l'aide d'une des méthodes de M. Wheatstone que M. Breguet a déduit, pour les constantes des piles que nous employons le plus ordinairement, les valeurs suivantes, exprimées en tours de son rhéostat.

PILES	VALEURS DE R.	VALEURS DE E.	VALEURS DE I.
Élément Bunsen, neuf et bien chargé.	25,05	55,60	25,30
Id. servant depuis 15 jours	30,00	28,80	0,90
Id. après renouvellement des acides et amalgamation des zincs.	3,50	52,62	15,00
Élément de Daniell avec vase poreux et eau acidulée.	3,74	29,10	7,70
Id. avec vessie en guise de vase poreux.	1,54	30,12	19,50
Id. avec eau pure. . . .	11,60	66,00	5,60

Quatorze tours et demi du rhéostat de M. Breguet, représentaient un kilomètre de fil de fer galvanisé de quatre millimètres de diamètre.

Dernièrement, M. Bessolo, officier d'artillerie à l'armée

Piémontaise, a fait construire un nouveau système de rhéostat, qu'il dit être fort commode dans la pratique. La description de cet instrument ne m'ayant pas été envoyée à temps, je ne puis que le mentionner ici, quitte à en parler plus tard, s'il y a lieu.

APPENDICES

Pendant le cours de l'impression de ce premier volume , plusieurs perfectionnements importants ont été apportés à la pile et à quelques-uns des appareils que nous avons classés dans les 2^e, 3^e, 5^e et 6^e chapitres. Nous croyons donc indispensable, avant de clore ce 1^{er} volume, de leur consacrer quelques pages, afin de rendre notre édition plus complète.

APPENDICE AU CHAPITRE I.

Pile portative et à effet constant de MM. Breton, frères.
— Quoique n'offrant rien de nouveau dans les éléments qui la constituent, cette pile se présente sous une forme telle qu'elle peut se prêter à une foule d'applications importantes. C'est certainement une des plus heureuses combinaisons qu'on ait imaginées depuis longtemps pour les piles de faible intensité.

Cette pile est composée, pour l'un des éléments ou pôles, d'un mélange de poudre de cuivre rouge avec du poussier de bois, qui n'a d'autre effet que de mieux diviser les parties métalliques. Ces poudres sont mêlées ensemble dans une dissolution saturée de chlorure de calcium, qui en fait une mixture toujours humide, ce corps, comme on le sait, ayant la propriété d'absorber sans cesse l'humidité de l'air. Dans l'élément du second pôle, la poudre de cui-

vre est remplacée par de la poudre de zinc. Ces deux préparations mises dans un vase partagé en deux parties par une cloison poreuse, constituent une pile à effet constant, dont l'intensité est toujours la même, en raison de son état permanent d'humidité et du nombre indéfini de ces éléments.

MM. Breton avaient, dans l'origine, imaginé cette pile pour les applications électro-médicales; mais cette application n'est, à mes yeux, que bien secondaire, puisqu'elle possède une force d'aimantation assez énergique. On pourra donc l'employer avec infiniment d'avantages dans l'horlogerie électrique, et toutes les applications mécaniques de l'électricité qui n'exigeront pas une grande force; elles pourront par conséquent être substituées jusqu'à un certain point aux piles de Daniell, et n'ayant pas besoin d'être humectées, elles pourront fonctionner sans qu'on y touche en aucune façon, jusqu'à l'entière consommation de la poudre de zinc.

Pile de MM. Lacassagne et Thiers. — Si les journaux de province n'étaient pas sujets à erreur, relativement aux nouvelles scientifiques, on pourrait dire qu'une immense découverte aurait été réalisée, eu égard à la construction de la pile, par MM. Lacassagne et Thiers. Il paraîtrait, en effet, que cette nouvelle pile engendrerait de l'aluminium, métal précieux qui se vend encore aujourd'hui 1 fr. le gramme, d'où il résulterait, non-seulement que l'électricité ne coûterait plus rien, mais qu'on s'enrichirait à la produire pour l'utiliser comme agent de chauffage, d'éclairage, de force mécanique, etc.

D'après les journaux de Lyon, le nouveau générateur d'électricité serait une pile sèche qui fonctionnerait sans eau ni acides. Ces liquides seraient remplacés par des sels anhydres qu'on ferait passer à l'état de fusion ignée, et pendant cette opération on verrait se produire d'une part

l'électricité nécessaire pour l'éclairage, de l'autre l'aluminium.

L'appareil se composerait de deux creusets concentriques, séparés par un cylindre de fer; on chargerait le cylindre extérieur avec du sel marin, le cylindre intérieur avec un sel d'alumine. Enfin, un cylindre ou un parallépipède de charbon plongerait dans le creuset intérieur. L'appareil étant chauffé au rouge, on verrait les deux sels entrer en fusion et aussitôt qu'on unirait les deux conducteurs, soudés, l'un au fer, l'autre au charbon, il se produirait une action électrique d'une remarquable puissance. Cette pile aurait encore la propriété, non-seulement d'agir avec une série d'éléments de même nature, et d'arriver ainsi à un degré de puissance énorme, mais encore de pouvoir s'accoupler avec des piles d'un autre genre.

Il paraîtrait que l'aluminium se déposerait au fond du creuset intérieur, après deux heures d'exposition de la pile au feu; il se présenterait, soit sous la forme de grenailles, soit sous celle d'un culot.

Je ne parlerai pas des récits emphatiques des journaux de Lyon, sur les expériences de MM. Lacassagne et Thiers, je ferai seulement observer que plusieurs personnes qui se sont dérangées tout exprès, pour aller voir, par elles-mêmes, cette pile merveilleuse, et s'assurer de la vérité, non-seulement n'ont rien vu, mais encore n'ont rien pu apprendre de précis à cet égard. Quant à moi, je me suis donné la peine d'écrire à M. Lacassagne, pour avoir des renseignements, et il a jugé à propos de ne pas me répondre.

Cette pile serait-elle un canard?...

Pile de M. Doat. — Cette pile comme celle de M. Pogendorff, que nous avons décrite page 100, a été imaginée en vue de retirer économiquement des résidus qui en proviennent, les substances premières qui ont servi à la faire

fonctionner. Ces substances premières sont l'iode et le mercure, et voici quel rôle elles remplissent dans cette pile :

Le mercure est déposé en couche mince, au fond d'une cuvette carrée de gutta-percha EFGH, fig. 22, pl. I. (Cette figure représente un élément de cette pile, vu en coupe.) Au-dessus de cette couche de mercure est versée une dissolution d'iodure de potassium, et sur ce liquide flotte une seconde cuvette dont les côtés sont en gutta-percha, mais dont le fond est en porcelaine poreuse. Enfin, dans cette seconde cuvette se trouve appliquée une grille conductrice A, faite en charbon de cornue, et sur laquelle sont déposés quelques cristaux d'iode. Cette grille plonge dans une légère couche d'iodure de potassium, et constitue le pôle positif de l'élément. Le mercure constitue le pôle négatif.

Dans cette pile, la cause initiale du dégagement électrique, au lieu d'être une oxydation comme dans les piles Bunsen, est l'ioduration du mercure. L'iodure de potassium, en effet, étant en contact avec ce liquide métallique, se décompose pour former, d'un côté du proto-iodure de mercure, qui ne tarde pas à passer à l'état de periodure de mercure, en revivifiant par ce seul fait une partie du mercure qui le constitue, et de l'autre une combinaison nouvelle du potassium devenu libre avec l'iode placé en provision sur la grille de charbon. Cette dernière combinaison qui réalise l'effet de l'absorption de l'hydrogène dans les piles de Bunsen, et qui rend dans la nouvelle pile le dégagement électrique plus constant et plus énergique, reconstitue de l'iodure de potassium, de telle sorte que la solution excitante se trouve entretenue au même degré de saturation jusqu'à l'entière absorption de l'iode. Si l'on considère maintenant que le periodure de mercure, qui se forme comme résidu et qui sature plus ou moins la solution d'iodure de potassium, provoque l'action excitante de cette solution, au lieu de la diminuer comme le fait le sulfate

de zinc dans les piles Bunsen, on comprendra facilement que cette pile doit être d'une constance remarquable.

Quand l'iode qui est sur la grille de charbon est entièrement épuisé, la solution d'iodure de potassium n'étant plus entretenue se sature complètement de periodure de mercure, et alors la pile s'affaiblit considérablement. Pour révivifier les éléments excitateurs, M. Doat commence par chauffer, sous un large récipient de verre et dans une capsule de platine, la dissolution qu'il a retirée de la pile (au moyen d'un syphon). A une température qui n'est pas très-élevée le periodure de mercure se volatilise et vient se condenser sur les parois du récipient, laissant dans la capsule l'iodure de potassium qui se trouve ainsi révivifié. En prenant ensuite ce periodure de mercure qui a été condensé, et le mêlant à de la baryte caustique, de manière que celle-ci soit en excès, il se forme un oxyde de mercure et un iodure de barium qu'il devient facile de séparer par un nouveau chauffage. Le mercure, en effet, se volatilise et vient se condenser en gouttelettes très-fines sur les parois du récipient. Pour le recueillir, ce récipient est emboîté dans une large rigole circulaire, pratiquée sur une plaque de fer. Alors, les gouttelettes de mercure, en glissant le long des parois du récipient, viennent se réunir dans la rigole et forment bientôt une masse plus ou moins compacte de mercure liquide. Après cette seconde opération de chauffage il reste dans la capsule de l'iodure de barium, dont on extrait l'iode en ajoutant de l'eau mêlée à quelques cristaux d'iode et en faisant chauffer de nouveau. L'iode se cristallise sur les parois du récipient, et par une évaporation à siccité, on finit par avoir pour résidu définitif de la baryte caustique qui sert pour une nouvelle révivification.

Au premier abord, quand on considère le prix élevé de l'iode et du mercure, les dimensions considérables qu'on est obligé de donner à chaque élément pour qu'il présente

à l'action chimique, une surface métallique suffisamment grande, le soin qu'il faut apporter à l'installation de ces différents éléments pour que leur horizontalité soit parfaite, on pourrait croire que cette pile n'est guère susceptible d'une application pratique. Mais, si, à ces inconvénients on oppose les avantages qu'elle présente, la production d'un courant énergique, rigoureusement constant, pendant plusieurs jours consécutifs, la possibilité de revivifier au prix courant d'une très-minime quantité de charbon les matières excitantes, on finira par comprendre que dans les applications en grand de l'électricité où la dépense première des appareils n'est que très-peu de chose auprès des dépenses d'entretien, ces piles pourraient être d'une très-grande ressource. Ces applications en grand, sauf celles qui se rapportent à l'argenture, à la dorure et à l'électrotypie, n'existent pas encore, il est vrai, mais elles pourront être créées un jour, et c'est alors qu'il sera important d'employer des piles dont les éléments puissent se revivifier. Quant à l'installation des piles dont nous parlons, elle deviendrait dans ce cas facile, car on pourrait en disposer les différents éléments sur des étagères superposées dont les planches pourraient être inclinées plus ou moins, à l'aide d'une tige munie d'une vis à écrou, jusqu'à ce que leur horizontalité fût complète.

Nous devons dire toutefois que la force électro-motrice qui se trouve développée dans ces piles étant moitié de celle des piles Bunsen, l'électricité qu'elles fournissent a peu de tension, mais en revanche elle s'y trouve développée en quantité considérable. Il y aurait donc des applications spéciales, et, la galvanoplastie serait de ce nombre, où ces piles devraient être principalement choisies. M. Doat calcule que la force d'un élément de sa pile est un tiers plus faible que celle d'un pareil élément de Bunsen de même surface.

Modifications apportées à la pile de MM. Jedlick et Csapo. — Nous avons longuement insisté, page 82, sur les avantages que présentait la pile de MM. Jedlick et Csapo, et les importants résultats qu'elle avait fournis. Des expériences ultérieures ont démontré aux inventeurs que l'eau salée devait être substituée à l'eau acidulée, pour éviter l'échauffement considérable qui se manifeste au sein de cette pile, quand elle fonctionne avec ce dernier liquide. Le dégagement électrique est à la vérité un peu amoindri par cette substitution, mais on y gagne plus de régularité dans l'action.

On parle encore d'une nouvelle pile dans laquelle le dégagement électrique résulterait de la projection d'un jet de vapeur d'eau sur des charbons incandescents. Mais les détails qui m'ont été donnés à cet égard ne sont pas assez précis pour que je puisse en parler avec connaissance de cause.

APPENDICE AU CHAPITRE II.

SUR LES CIRCUITS ET LES COURANTS.

Bruits produits par les poteaux des lignes télégraphiques. — Il n'est guère de personnes qui, demeurant dans le voisinage des lignes télégraphiques, n'aient eu occasion d'entendre un bruit sourd, imitant, tantôt les roulements d'un tambour éloigné, tantôt le bourdonnement d'une abeille, tantôt le défilement des engrenages d'un moulin, que produisent dans certaines circonstances, les poteaux télégraphiques. Les paysans en général croient que ce bruit indique le passage de l'électricité. Mais, bien que ce fluide, dans les réactions moléculaires qu'il exerce, provoque sous certaines conditions quelques sons, ainsi que l'a constaté M. Wartmann, il ne faudrait pas croire que les bruits dont nous parlons aient pour cause le mouvement

de cet agent physique. La meilleure preuve à donner contre ce préjugé, c'est que ces bruits existent, alors même que le courant électrique ne circule pas dans la ligne. Du reste, leur intensité dépend de beaucoup de circonstances : 1^o de l'orientation de la ligne par rapport à la direction des courants d'air existants ; 2^o de la hauteur des poteaux et de leur exposition ; 3^o de la nature du sol dans lequel ils sont plantés ; 4^o de l'altitude à laquelle ils sont élevés ; 5^o de la distance qui les sépare ; 6^o du nombre de fils soutenus par chaque poteau ; 7^o de l'impétuosité du vent. En général, ces bruits atteignent leur maximum quand la direction de la ligne est perpendiculaire à celle des courants d'air ; quand les poteaux sont très-hauts et que la ligne est dégagée de tous les obstacles qui peuvent s'opposer à la libre circulation des courants d'air, quand le terrain dans lequel les poteaux sont plantés est pierreux ; quand la ligne passe par le sommet d'une montagne ; quand la longueur des fils entre ces poteaux est considérable ; quand les fils soutenus sont peu nombreux ; enfin, quand le vent est un peu fort. Ces faits prouvent que c'est à des vibrations extrêmement petites, produites par les courants d'air sur les fils des lignes télégraphiques, qu'on doit attribuer le phénomène dont nous parlons. Il se produit alors un effet analogue à celui qui se manifeste dans les harpes éoliennes ; seulement, comme la longueur et le peu de tension des fils dans le cas qui nous occupe, ne permet pas aux courants d'air de produire des vibrations assez nettes et assez courtes pour qu'elles soient sonores, ces vibrations s'intègrent aux points de suspension des fils, et font à leur tour vibrer le poteau. C'est sans doute un phénomène analogue à celui des pendules sympathiques du capitaine Elicott. Cette expérience curieuse, qui montre tout le pouvoir des vibrations intégrées, consiste, comme on le sait, à placer deux pendules sur une même traverse rigide et à mettre l'un d'eux

en mouvement d'oscillation. Au bout d'un certain temps les vibrations produites au point de suspension de ce pendule et intégrées à travers la barre rigide, réagissent sur le second pendule et finissent bientôt par être assez fortes pour le mettre en mouvement. Rien n'est donc étonnant que les vibrations prolongées du fil d'une ligne télégraphique puissent mettre en vibration les poteaux eux-mêmes qui le supportent. Du reste, cette vibration des poteaux est facile à constater, car elle est sensible au toucher. En approchant l'oreille, on entend même souvent des renforcements de vibrations qui se succèdent à des intervalles plus rapprochés que des pulsations, et qui laissent percer parfois des sons métalliques qui démontrent bien la part que prend le crochet de suspension des fils dans ce phénomène.

Dans certains pays de montagnes, notamment sur la route de la Corniche, près de Nice, ces bruits sont quelquefois tellement intenses, qu'ils s'entendent à une distance de plus de quinze pas. On se croirait alors dans le voisinage d'une usine où se trouverait un ventilateur à force centrifuge.

Du reste, pour que ces bruits s'entendent, il n'est pas besoin d'un grand vent, le moindre courant d'air suffit, pourvu qu'il agisse perpendiculairement sur le fil. C'est pourquoi, il arrive souvent dans les pays de montagnes où les lignes télégraphiques sont très-contournées, que l'intensité des sons produits varie d'un poteau à l'autre.

APPENDICE AU CHAPITRE III

SUR LES ÉLECTRO-AIMANTS.

Armatures électro-aimants de M. Cecchi. — Dans une note qu'il a adressée à la *Ricreazione*, M. Cecchi donne quelques détails sur une disposition spéciale d'armatures

électro-aimants qu'il recommande pour la télégraphie électrique. Cette disposition consiste à articuler entre les quatre pôles de deux aimants persistants en fer à cheval, une armature électro-aimant de la forme indiquée fig. 7, pl. II. En faisant en sorte que cette articulation se fasse sur deux pointes aux deux extrémités des palettes qui ressortent de la bobine, et sur le prolongement de l'axe de celle-ci, on arrive à obtenir que le poids de la bobine n'ait aucune influence sur le mouvement de cette espèce d'armature, et l'on bénéficie de cette manière de toute la puissance d'aimantation dont le fer est susceptible, sans qu'on ait à craindre la désaimantation. Ce système revient, comme on le voit, à celui de M. Glæsner, que nous avons représenté fig. 43, à cette différence près que la bobine, dans ce dernier système, étant assujettie aux mêmes mouvements que l'armature, augmente considérablement l'inertie de celle-ci et s'oppose à la promptitude de ses oscillations. C'est du reste ce que j'avais déjà fait remarquer, page 228.

En fixant dans une position invariable la bobine des armatures électro-aimants, et en aplatissant le canon de cette bobine, on pourrait obtenir des armatures électro-aimants qui seraient mobiles à l'intérieur de leur bobine, et qui n'auraient pas alors plus de poids que les armatures de fer ordinaires. Avec cette disposition, on pourrait adapter à l'armature tout système d'articulation que l'on voudrait, ce qui serait un grand avantage et ce qui résoudrait complètement le problème des électro-aimants à armatures aimantées, dont j'avais un peu contesté l'efficacité, page 223.

APPENDICE AU CHAPITRE V

SUR LES RELAIS ET RHÉOTOMES.

Rhéotome de M. Foucault. — Voulant détruire complètement l'étincelle de l'extra-courant qui se manifeste au point de rupture du courant inducteur dans l'appareil de Ruhmkorff, M. Foucault a imaginé dernièrement de combiner un rhéotome à mercure dans lequel l'armature vibrante opère les fermetures du courant par l'immersion, dans le mercure, d'un appendice de platine qu'elle porte et dans lequel les interruptions du courant sont faites au sein d'un liquide non conducteur superposé au mercure. De cette manière, en effet, l'étincelle de l'interrupteur se trouve à peu près détruite, et l'oxydation des points de contact du rhéotome n'est plus à craindre, puisque c'est un métal liquide qui remplace un métal solide.

Ce système d'interruption pourrait être appliqué aux interrupteurs et aux commutateurs de forts courants.

APPENDICE AU CHAPITRE VI

SUR LES INTERMÉDIAIRES ÉLECTRO-MÉCANIQUES.

Répartiteur de MM. Fabre et Kunemann. — Pour obtenir l'égalisation de la force attractive des électro-aimants, MM. Fabre et Kunemann qui, comme nous l'avons dit, page 209, construisent leurs électro-aimants avec une enveloppe de fer doux, arrondissent la surface de contact de leur armature en prenant pour système d'articulation une pointe engagée dans un trou, au centre du pôle intérieur de l'électro-aimant. Quand cette armature est inclinée par rapport à la ligne axiale de l'électro-aimant, et qu'elle est à son maximum d'écart, la première attraction qui agit sur

elle est plus énergique que si elle avait une surface droite, puisque l'attraction du pôle intérieur de l'électro-aimant s'exerce de plus près; mais à mesure que cette partie bombée de l'armature vient s'appliquer et se développer sur ce pôle intérieur, la partie inclinée de cette même armature se redresse, en sorte que l'attraction finale ne résulte plus que de l'équilibre qui tend à s'établir entre les forces attractives des deux pôles, et s'exerce jusqu'à ce que l'axe de l'armature ait pris une position parallèle à la ligne axiale de l'électro-aimant.

D'après cela, on comprend facilement que la force attractive initiale se trouve augmentée et la force finale diminuée, sans que les pièces mobiles aient perdu de leur course.

Cette disposition peut être renversée, et alors l'électro-aimant devient mobile et l'armature est fixe.

Nouveau transformateur de mouvement, de M. Breguet.— Nous avons vu, page 341, comment une ancre d'échappement, réagissant sur les plans inclinés des dents d'une roue à rochet, pouvait transformer un mouvement de va-et-vient dont elle est animée, en mouvement circulaire saccadé. Mais cette transformation exige beaucoup de force, puisque c'est par l'effet d'un glissement que le mouvement est produit. Voulant obtenir, pour les deux mouvements opposés de l'armature d'un électro-aimant, un double échappement comme dans le système précédent, mais sans avoir recours pour cela à aucun système de glissement, M. Breguet a combiné un nouveau système d'échappement dans lequel la force agit d'une manière directe, par l'intermédiaire de deux roues à rochet reliées l'une à l'autre par une roue commune.

Pour fixer les idées, supposons placées l'une à côté de l'autre, dans le même plan, deux roues à rochet dentées en sens inverse et portant sur leur axe de rotation une roue

d'engrenage. Supposons que ces roues d'engrenages, qui marcheront en sens inverse l'une de l'autre par l'action des rochets, soient d'égal diamètre et engrènent avec une troisième roue montée sur un axe indépendant. On comprendra qu'une fourchette à laquelle sera adaptée l'armature de l'électro-aimant, et dont les branches porteront chacune un cliquet d'impulsion, pourra réagir en s'inclinant d'un côté ou de l'autre, tantôt sur le rochet de droite, tantôt sur le rochet de gauche. Or, chacun de ces mouvements étant traduit dans le même sens par la roue intermédiaire, le double effet des échappements à ancre se trouve ainsi réalisé, mais sans décomposition de la force motrice. M. Breguet a appliqué ce système à un de ses compteurs électro-chronométriques. Nous en parlerons avec plus de détails dans le prochain volume.

Régulateur électro-mécanique des ressorts antagonistes, de M. Moulleron. — Pour mettre la tension des ressorts antagonistes des mécanismes électro-magnétiques en rapport avec la force électrique qui agit sur eux, M. Moulleron leur adapte un petit mécanisme d'horlogerie supplémentaire [commandé par un électro-aimant spécial], qui a pour fonction de tendre, au moyen de deux poulies sur lesquelles ils s'enroulent, les fils d'attache des ressorts antagonistes. Cet électro-aimant du mécanisme supplémentaire est interposé dans le même circuit que l'électro-aimant du mécanisme télégraphique; mais la tension des ressorts est tellement combinée que c'est seulement quand l'armature de l'électro-aimant supplémentaire ne peut plus fonctionner par suite du serrage progressif de son ressort, que le réglage de la force antagoniste du mécanisme télégraphique est opéré. Nous donnerons dans le prochain volume le dessin de cette ingénieuse disposition.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
PRÉFACE.....	v

LIVRE PREMIER

EXPOSÉ DES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES

I

ÉLECTRICITÉ STATIQUE.....	4
---------------------------	---

II

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.....	9
----------------------------	---

III

MAGNÉTISME.....	16
-----------------	----

IV

ÉLECTRO-MAGNÉTISME.....	20
Électricité magnétique ou d'induction.....	23

V

DIVERSES CAUSES PRODUCTRICES DE L'ÉLECTRICITÉ.....	27
Électricité thermique.....	28
Électricité développée par une action mécanique.....	31
Électricité développée par les réactions chimiques.....	33

	Pages
<i>Électricité animée.....</i>	<i>34</i>
<i>Électricité développée par les végétaux.....</i>	<i>35</i>
<i>Électricité développée par les réactions physiques.....</i>	<i>Id.</i>

VI

<i>TRANSMISSION DE L'ÉLECTRICITÉ.....</i>	<i>37</i>
<i>Vitesse de l'électricité.....</i>	<i>Id.</i>
<i>Conducteurs des courants.....</i>	<i>42</i>
<i>Conductibilité de la terre.....</i>	<i>44</i>

LIVRE II.

NOTIONS TECHNOLOGIQUES.

I

DE LA PILE.

<i>Considérations théoriques et historiques.....</i>	<i>51</i>
<i>Mode de développement électrique dans les réactions chimiques....</i>	<i>Id.</i>
<i>Historique des divers perfectionnements de la pile.....</i>	<i>54</i>
<i>Théorie de la pile.....</i>	<i>60</i>
<i>Formules des piles voltaïques.....</i>	<i>64</i>
<i>Dispositions diverses de la pile, sa manipulation, son montage, question économique.....</i>	<i>69</i>
<i>Piles de Grove, de Bunsen, d'Archeveau.....</i>	<i>Id.</i>
<i>Manipulation des piles de Bunsen.....</i>	<i>73</i>
<i>Système d'Archeveau.....</i>	<i>74</i>
<i>Système de Th. du Moncel.....</i>	<i>77</i>
<i>Système de M. Fabre de la Grange.....</i>	<i>80</i>
<i>Système de MM. Jedlick et Csapo.....</i>	<i>82</i>
<i>Modifications apportées aux piles à acides.....</i>	<i>86</i>
<i>Système de M. Le Roux.....</i>	<i>87</i>
<i>Système de M. Guignet.....</i>	<i>89</i>
<i>Autre système de M. Le Roux.....</i>	<i>91</i>
<i>Système de MM. Liais et L. Fleury.....</i>	<i>Id.</i>
<i>Système de M. Lavenarde.....</i>	<i>93</i>
<i>Système de M. de la Rive.....</i>	<i>94</i>
<i>Système de M. Croissant.....</i>	<i>Id.</i>
<i>Système de M. l'abbé de Laborde.....</i>	<i>Id.</i>
<i>Système de M. Froment.....</i>	<i>96</i>

	Pages
<i>Question économique des piles à acides</i>	97
Procédé d'Archereau.....	<i>Id.</i>
Système de MM. Glukemann, Payerne, Frascara.....	98
Système de M. Watson.....	<i>Id.</i>
Système de M. Martins-Roberts.....	99
Système de M. Poggendorf.....	100
Système de MM. de La Vallette et Dulaurier.....	<i>Id.</i>
<i>Piles de Daniell</i>	101
Système français et allemand.....	104
Système de MM. Parelle et Vérité.....	105
Système de MM. Wheatstone.....	106
Autres systèmes de piles de Daniell.....	107
<i>Piles à un liquide</i>	<i>Id.</i>
Pile de Smée et Wollaston.....	<i>Id.</i>
Pile de Bagnaton.....	109
Pile à sable.....	<i>Id.</i>
Élément de M. Pray.....	110
Élément de M. Mœnig.....	112
Pile de MM. Fabre et Kunemann.....	<i>Id.</i>
Pile de M. Weare.....	113
Pile de Muncke.....	<i>Id.</i>
Pile de M. Ed. Becquerel.....	114
Piles en chaînes de M. Pulver-Macher.....	<i>Id.</i>
Autres systèmes de chaînes galvaniques.....	119
<i>Piles sèches</i>	120
<i>Piles à gaz</i>	122
Pile à gaz de M. Grove.....	<i>Id.</i>
Piles hydrodynamique de Carosio.....	123
<i>Génération de l'électricité</i>	130
<i>Remarques générales sur les piles</i>	131
Polarité des éléments sur lesquels se développe l'électricité dans les piles, suivant qu'on les considère par rapport au circuit ou par rapport à la pile.....	<i>Id.</i>
Polarisation électrique.....	132
Dépolarisation par l'air atmosphérique.....	133
<i>Appareils dépolarisateurs</i>	134

II

DES CIRCUITS ET DES COURANTS.

Propagation du fluide électrique dans les circuits voltaïques.....	135
Expériences de M. Wheatstone.....	137

	Pages
Réactions extérieures des courants.....	145
Expériences de M. Faraday.....	147
Lois de propagation des courants.....	151
Conductibilité des corps pour l'électricité.....	156
Réactions réciproques des électricités développées par deux sources différentes, sur le même conducteur.....	160
Réaction dynamiques des courants.....	162
Effets de certaines réactions extérieures sur les circuits électriques.....	165
Organisation et disposition des conducteurs.....	166
Conducteurs simples.....	167
Conducteurs métalliques.....	Id.
Conducteurs liquides et terrestres.....	171
Conducteurs des lignes télégraphiques.....	176
Conducteurs complexes.....	180
Câbles sous-marins.....	181
Tracé des lignes sous-marines.....	183
Composition des câbles.....	184
Immersion des câbles.....	187
Conservation et durée des câbles.....	188

III

ORGANES ÉLECTRIQUES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE EMPLOYÉS DANS LES
APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ.

<i>Électro-aimants</i>	191
Conditions de forces des électro-aimants.....	192
Différentes formes des électro-aimants.....	203
<i>Électro-aimants droits</i>	Id.
<i>Électro-aimants recourbés</i>	205
<i>Armatures</i>	212
Disposition des armatures.....	Id.
Ressorts antagonistes.....	216
Buttoirs d'arrêt.....	218
Forme des armatures.....	219
<i>Électro-aimants à armatures aimantées</i>	221
Dispositions différentes des électro-aimants à armatures aimantées.....	226
<i>Transmissions magnétiques</i>	230
<i>Autres moyens d'obtenir des effets d'attraction temporaire</i>	231
Bobines magnétiques.....	232
Cadres galvanométriques.....	234

TABLE DES MATIÈRES.

477

	Pages
<i>Organes électro-chimiques</i>	235
<i>Construction des électro-aimants</i>	238

IV

INTERRUPTEURS ET COMMULATEURS.

<i>Interrupteurs</i>	244
<i>Commuteurs</i>	258
<i>Commuteurs à renversement de pôles</i>	265

V

RELAIS ET RHÉOTOMES.

<i>Relais</i>	282
<i>Rhéotomes</i>	289
Premier système. — Rhéotomes destinés à prolonger la fermeture du courant.....	<i>Id.</i>
Deuxième système. — Rhéotomes assujettis à des effets mécaniques déterminés.....	293
Troisième système. — Rhéotomes destinés à interrompre secondaire- ment le courant dans un circuit pour le reporter dans deux ou plusieurs autres.....	297

VI

INTERMÉDIAIRES ÉLECTRO-MÉCANIQUES.

<i>Électro-transmetteurs de mouvement</i>	308
Système de M. Nicklès.....	309
Systèmes de M. Achard.....	310
<i>Répartiteurs électriques</i>	317
Répartiteur de M. Callaud.....	<i>Id.</i>
Répartiteur de M. Robert-Houdin.....	318
Répartiteur de M. Froment.....	322
<i>Remontoirs électriques</i>	323

	Pages
Remontoir de M. Th. Du Moncel.....	328
Remontoir de M. Froment.....	325
Échappements et détentés.....	326
Détentes.....	Id.
Échappements.....	329
Doubles échappements.....	333
Échappements à encliquetages.....	336
Transformateurs de mouvement.....	340
Régulateurs de courants.....	343
Régulateur de M. Jaxton.....	344
Régulateur de M. Wartmann.....	344
Régulateur de M. X.....	346
Régulateur de M. Froment.....	347
Pile plongeante de M. Robert-Houdin.....	348

VII

MACHINES D'INDUCTION.

<i>Machines magnéto-électriques fondées sur l'aimantation temporaire du fer doux.....</i>	<i>353</i>
Machine magnéto-électrique de Jaxton et de Clarke.....	354
Machine de M. Pixii.....	359
Machine de M. Page.....	360
Machine de M. Wheatstone.....	361
Machine de l'usine à gaz des Invalides.....	Id.
Machines magnéto-électriques à mouvement alternatif.....	364
<i>Machines magnéto-électriques fondées sur la suspension du courant magnétique par une réaction statique.....</i>	<i>365</i>
Machine magnéto-électrique de MM. Breton.....	366
Machine du docteur Duchenne.....	368
Machine du docteur Dujardin.....	372
<i>Machines magnéto-électriques à bobines d'induction combinées.....</i>	<i>373</i>
<i>Appareils d'induction voltaïque.....</i>	<i>374</i>
Appareils d'induction de M. J. Mirand.....	376
Appareil d'induction de MM. Breton.....	377
Appareil Volta-Féradique de M. Duchenne.....	378
Machine d'induction de Ruhmkorff.....	382
Appareil d'induction de M. Cecchi.....	389
Machine d'induction de M. Poggendorff.....	394
Appareil d'induction de M. Paul de Vigan.....	395

	Pages
<i>Machines électriques à frottement</i>	396
Machines à plateau de verre.....	396
Électrophore.....	399
Machine électrophorique de M. Girardon.....	400

VIII

INSTRUMENTS D'EXPÉRIMENTATION.

<i>Électroscope et électromètres</i>	403
Électroscopes à balles de sureau, à feuilles d'or, à condensateur, etc. <i>Id.</i>	
Électromètres.....	407
Balance de torsion de Coulomb.....	408
Balance bifilaire de M. Harris.....	409
Électromètre de Peltier.....	410
Électromètre de Melloni.....	416
Inductomètre de M. Th. Du Moncel.....	422
Électromètre de Lane.....	423
<i>Galvanomètres et rhéomètres</i>	424
Boussoles et rhéomètres.....	<i>Id.</i>
Boussole de M. Loisean.....	425
Balance de torsion galvanométrique.....	<i>Id.</i>
Boussole des sinus de M. Pouillet.....	<i>Id.</i>
Boussole des tangentes du même.....	427
Boussole des sinus des postes télégraphiques.....	428
Magnétomètre de Weber.....	430
Dynamomètre électrique de Weber.....	432
Balance électro-magnétique de M. Becquerel.....	433
Multiplicateur à hélices du même.....	435
Thermo-galvanomètre de M. Reiss.....	<i>Id.</i>
Boussole de MM. Fabre et Kunemann.....	437
<i>Galvanomètres</i>	<i>Id.</i>
Galvanomètre de Nobili.....	<i>Id.</i>
Galvanomètre différentiel de M. Becquerel.....	439
Galvanomètre de M. Dubois-Reymond.....	441
Galvanomètre portatif de Rubinkorff.....	442
<i>Procédés galvanométriques divers</i>	443
Régulateurs électro-musicaux.....	444
<i>Rhéostats</i>	446
APPENDICES.....	460
Appendice au chapitre I ^{er} , sur la disposition des piles.....	<i>Id.</i>

	<i>Pages</i>
Pile portative de MM. Breton.....	460
Pile de MM. Lescassagne et Thiers.....	461
Pile de M. Doat.....	462
Modifications apportées à la pile de MM. Jedlick et Csapo.....	466
<i>Appendice au chapitre II, sur les circuits et les courants.....</i>	<i>Id.</i>
Bruits produits dans les poteaux des lignes télégraphiques.....	<i>Id.</i>
<i>Appendice au chapitre III, sur les électro-aimants.....</i>	<i>Id.</i>
Armatures électro-aimants de M. Cecchi.....	<i>Id.</i>
<i>Appendice au chapitre V, sur les relais et les rhéotome.....</i>	<i>Id.</i>
Rhéotome de M. Foucault.....	<i>Id.</i>
<i>Appendice au chapitre VI, sur les intermédiaires électro-mécaniques.....</i>	<i>Id.</i>
Répartiteur de MM. Fabre et Kunemanu.....	<i>Id.</i>
Nouveau transformateur de mouvement de M. Breguet.....	471
Régulateur électro-mécanique des ressorts antagonistes, de M. Moulleron.....	<i>Id.</i>

ERRATA.

P. 215, ligne 23, au lieu de : fig. 27, lisez : fig. 34.

P. 275, l. 23, au lieu de : s'avancera en *c*, en *b* et en *a* ; mais lorsque ce levier sera arrivé en *d'*, lisez : s'avancera en *c'*, en *b'* et en *a'* ; mais lorsque ce levier sera arrivé en *d*.

P. 277, l. 16, au lieu de : ET, E'F ; lisez : EF, E'F'.

P. 278, l. 20, au lieu de : HF, BD, lisez : HD, BF.

P. 280, l. 22, au lieu de : fig. 17, lisez : fig. 48.

Même page, l. 29, au lieu de : l'anneau *IJ* et le bouton *I*, lisez : l'anneau *IJ* et le bouton *O*.

P. 319, l. 23, au lieu de : l'extrémité du levier *D'C'*, lisez : l'extrémité du levier *D'O'*.

P. 334, par la gauche et la droite il faut entendre la gauche et la droite d'un spectateur qui serait couché sur les tiges des échappements, la tête dirigée du côté de la roue à rochet, et la face tournée en dehors.

Fig. 7.

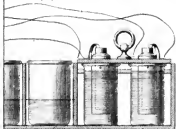


Fig. 8.

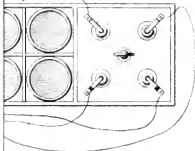


Fig. 10.



Fig. 19.

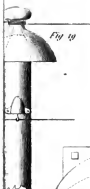


Fig. 18.

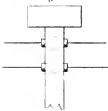


Fig. 20.

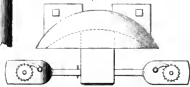
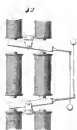
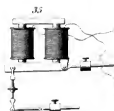
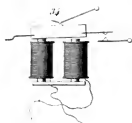
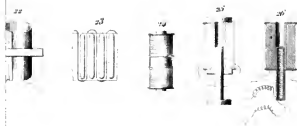


Fig. 21.







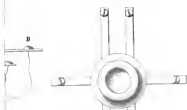


Fig. 5.



Fig. 10.



Fig. 19.

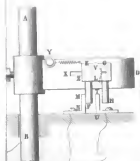


Fig. 26.



Fig. 12.

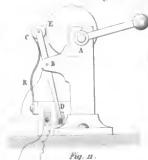


Fig. 11.

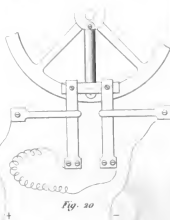


Fig. 20.

Delineat.

1

1

1

1

Fig. 5.

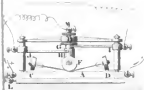


Fig. 6.

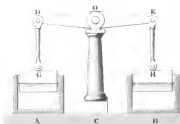


Fig. 12.

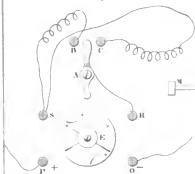


Fig. 13.

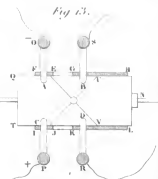


Fig. 18.

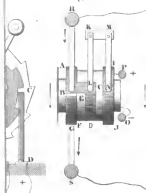


Fig. 18 bis

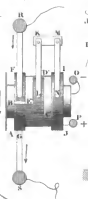
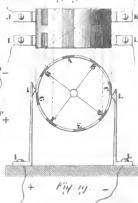
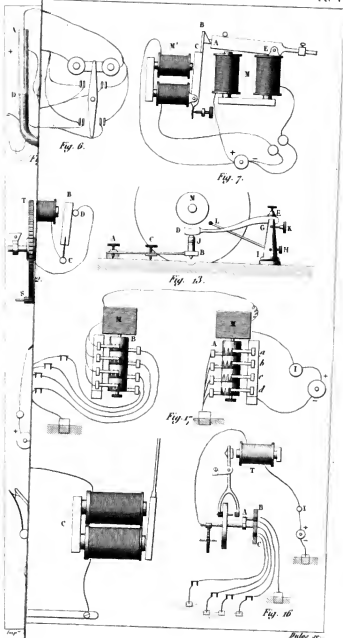


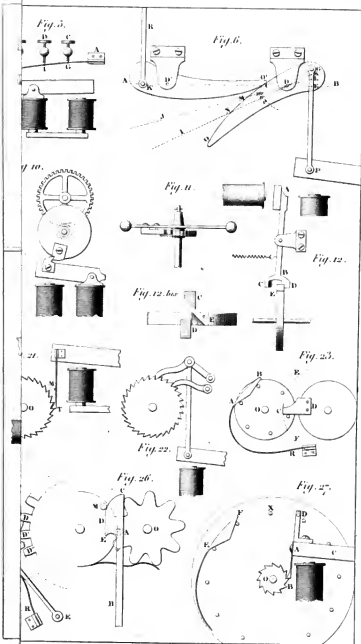
Fig. 19 bis



Dalme et.







Patent av.

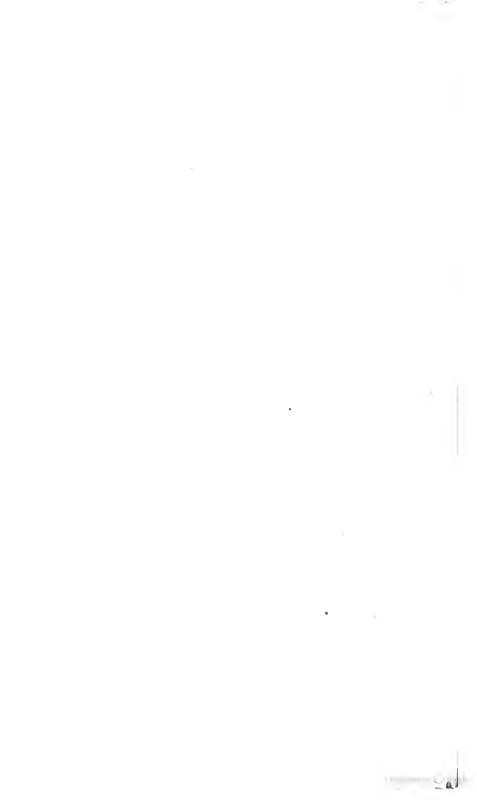
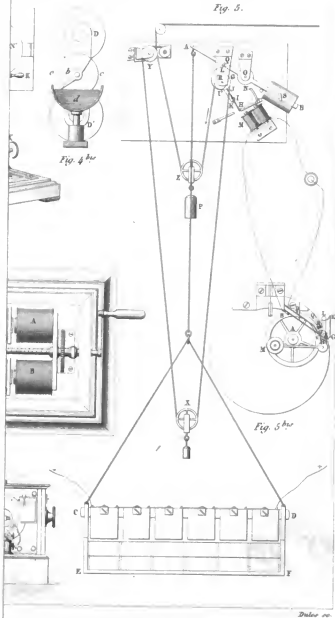
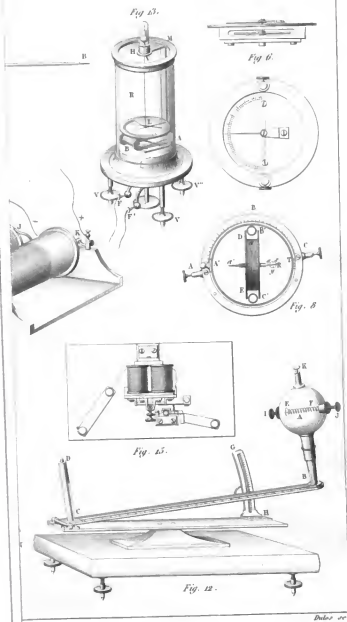


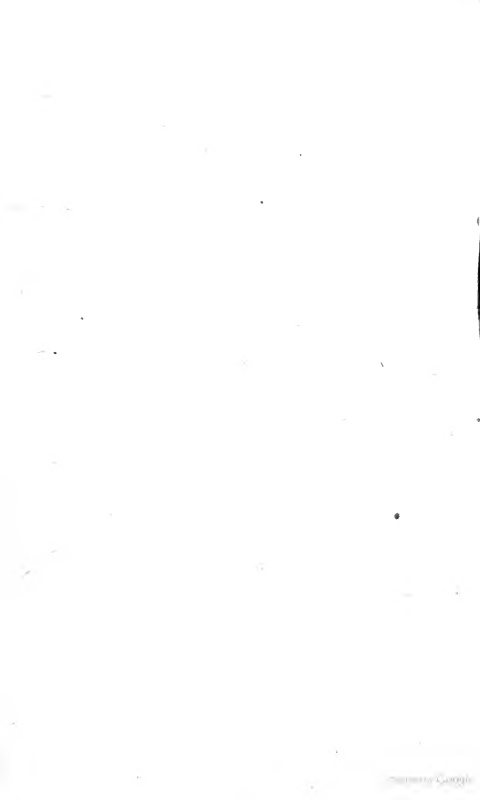
Fig. 5.





Delaunay sc.

00563 8908



CF 005698 909



